



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

MÁSTER EN EFICIENCIA Y APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

TFM Nº: **4523M01A1**

TÍTULO: **REPERCUSIÓN DEL USO DE LA TECNOLOGÍA CFL Y LED
DE ILUMINACIÓN EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN**

AUTOR: **ALBA CARBALLEIRA DEL POZO**

TUTOR: **MANUEL ÁNGEL GRAÑA LOPEZ**

FECHA: **JUNIO DE 2017**

Fdo.: EL AUTOR

Fdo.: EL TUTOR

TÍTULO: **REPERCUSIÓN DEL USO DE LA TECNOLOGÍA CFL Y LED**
DE ILUMINACIÓN EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

ÍNDICE GENERAL

PETICIONARIO: **ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: **JUNIO DE 2017**

AUTOR: **EL ALUMNO**

Fdo.: **ALBA CARBALLEIRA DEL POZO**

I	ÍNDICE GENERAL	2
	Contenidos del TFM	3
	Índice de figuras	5
	Índice de tablas	8
II	MEMORIA	10
	Índice del documento Memoria	11
1	Objeto	13
2	Alcance	14
2.1	Normas y referencias	15
2.1.1	Disposiciones legales y normas aplicadas	15
2.2	Bibliografía	15
2.3	Programas de cálculo	15
2.4	Otras referencias	16
3	Introducción y definición de conceptos	17
3.1	Calidad del Servicio Eléctrico	17
3.1.1	Armónicos	17
4	Sistemas de iluminación objeto de estudio	25
4.1	Lámparas LED	25
4.1.1	Descripción	25
4.1.2	Ventajas y desventajas	27
4.2	Lámparas de bajo consumo (CFL)	27
4.2.1	Descripción	27
4.2.2	Ventajas y desventajas	28
4.3	Comparativa entre distintos tipos de lámparas	29
5	Realización de medidas en laboratorio	30
5.1	Equipo de medición y software utilizado	30
5.2	Procedimiento	31
5.3	Resultados obtenidos	32
6	Modelización individual de las luminarias	36
6.1	Software y modelo utilizado	36
6.2	Resultados obtenidos	37
7	Efectos de las luminarias en conjunto	40
7.1	Comprobación del efecto de suma de corrientes armónicas	41
7.2	Estudio de la resonancia	41
7.2.1	Caso 1 - Transformador de 250 kVA	43
7.2.2	Caso 2 - Transformador de 400 kVA	44
7.2.3	Caso 3 - Transformador de 630 kVA	45
7.2.4	Caso 4 - Transformador de 800 kVA	46
7.2.5	Conclusiones	47

8	Soluciones para la reducción de distorsión armónica	49
8.1	Filtros pasivos	49
8.1.1	Filtros de rechazo	49
8.1.2	Filtros de absorción	50
8.2	Filtros activos	51
8.3	Comparativa	51
8.4	Diseño de un filtro de rechazo para un bloque de viviendas	52
9	Conclusiones	55
III	ANEXOS	57
	Índice del documento Anexos	58
10	Realización de medidas en laboratorio	59
10.1	Luminaria 1 - Lexman LED	60
10.2	Luminaria 2 - Megaled LED	62
10.3	Luminaria 3 - LED	67
10.4	Luminaria 4 - Philips LED	69
10.5	Luminaria 5 - Roblan LED	72
10.6	Luminaria 6 - H2V LED	74
10.7	Luminaria 7 - Lexman CFL	76
10.8	Luminaria 8 - Lexman CFL	81
10.9	Luminaria 9 - Froiz CFL	85
10.10	Luminaria 10 - Froiz CFL	87
10.11	Luminaria 11 - Lexman CFL	90
11	Modelización individual de las luminarias	93
11.1	Luminaria 1 - Lexman LED	94
11.2	Luminaria 2 - Megaled LED	95
11.3	Luminaria 3 - LED	97
11.4	Luminaria 4 - Philips LED	98
11.5	Luminaria 5 - Roblan LED	99
11.6	Luminaria 6 - H2V LED	100
11.7	Luminaria 7 - Lexman CFL	101
11.8	Luminaria 8 - Lexman CFL	103
11.9	Luminaria 9 - Froiz CFL	105
11.10	Luminaria 10 - Froiz CFL	106
11.11	Luminaria 11 - Lexman CFL	107

Índice de figuras

3.1.1.1	Forma de onda de componente fundamental y armónicos	18
3.1.1.2	Espectro armónico	19
3.1.1.3	Representación gráfica de la potencia de distorsión	21
4.1.1.1	Lámpara y diodo LED	25
4.1.1.2	Estructura de un Driver LED	26
4.1.1.3	Disipador de calor para lámpara LED	26
4.1.1.4	Componente óptico para lámpara LED	27
4.2.1.1	Componentes de una lámpara CFL	28
4.3.0.1	Porcentaje de energía transformada en luz según tipo de lámpara	29
5.1.0.1	Analizador C.A. 8331	31
5.1.0.2	Captura de pantalla del software utilizado para descargar los datos	31
5.2.0.1	Montaje realizado para la obtención de medidas en laboratorio	32
5.3.0.1	Luminaria 1	32
5.3.0.2	Forma de onda de la luminaria 1	33
5.3.0.3	Espectro armónico de la luminaria 1	34
6.1.0.1	Pantalla principal del programa OrCAD Capture	36
6.2.0.1	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 1	37
6.2.0.2	Onda de corriente modelizada para la luminaria 1	38
6.2.0.3	Comparativa entre ambas ondas de corriente	38
7.1.0.1	Comparativa de ángulos de fase para tercer y quinto armónico	41
7.2.0.1	Circuito equivalente de la red	42
7.2.1.1	Resonancia según nº de luminarias para transformador de 250 kVA	44
7.2.2.1	Resonancia según nº de luminarias para transformador de 400 kVA	45
7.2.3.1	Resonancia según nº de luminarias para transformador de 630 kVA	46
7.2.4.1	Resonancia según nº de luminarias para transformador de 800 kVA	47
8.1.1.1	Efecto de filtro de rechazo sobre frecuencia de resonancia en paralelo	49
8.1.1.2	Ejemplo de conexión de un filtro de rechazo	50
8.1.2.1	Ejemplo de conexión de un filtro de absorción	50
8.2.0.1	Ejemplo de funcionamiento de un filtro activo	51

8.4.0.1	Esquema del filtro de rechazo a calcular	53
10.1.0.1	Luminaria 1	60
10.1.0.2	Forma de onda de la luminaria 1	60
10.1.0.3	Espectro armónico de la luminaria 1	61
10.2.0.1	Luminaria 2	62
10.2.0.2	Forma de onda de la luminaria 2 (una luminaria)	63
10.2.0.3	Espectro armónico de la luminaria 2 (una luminaria)	64
10.2.0.4	Forma de onda de la luminaria 2 (dos luminarias)	65
10.2.0.5	Espectro armónico de la luminaria 2 (dos luminarias)	66
10.3.0.1	Luminaria 3	67
10.3.0.2	Forma de onda de la luminaria 3	67
10.3.0.3	Espectro armónico de la luminaria 3	69
10.4.0.1	Luminaria 4	69
10.4.0.2	Forma de onda de la luminaria 4	70
10.4.0.3	Espectro armónico de la luminaria 4	70
10.5.0.1	Luminaria 5	72
10.5.0.2	Forma de onda de la luminaria 5	72
10.5.0.3	Espectro armónico de la luminaria 5	73
10.6.0.1	Luminaria 6	74
10.6.0.2	Forma de onda de la luminaria 6	74
10.6.0.3	Espectro armónico de la luminaria 6	76
10.7.0.1	Luminaria 7	76
10.7.0.2	Forma de onda de la luminaria 7 (una luminaria)	77
10.7.0.3	Espectro armónico de la luminaria 7 (una luminaria)	77
10.7.0.4	Forma de onda de la luminaria 7 (dos luminarias)	79
10.7.0.5	Espectro armónico de la luminaria 7 (dos luminarias)	79
10.8.0.1	Luminaria 8	81
10.8.0.2	Forma de onda de la luminaria 8 (una luminaria)	81
10.8.0.3	Espectro armónico de la luminaria 8 (una luminaria)	82
10.8.0.4	Forma de onda de la luminaria 8 (dos luminarias)	83
10.8.0.5	Espectro armónico de la luminaria 8 (dos luminarias)	84
10.9.0.1	Luminaria 9	85
10.9.0.2	Forma de onda de la luminaria 9	85
10.9.0.3	Espectro armónico de la luminaria 9	87
10.10.0.1	Luminaria 10	87
10.10.0.2	Forma de onda de la luminaria 10	88
10.10.0.3	Espectro armónico de la luminaria 10	88
10.11.0.1	Luminaria 11	90
10.11.0.2	Forma de onda de la luminaria 11	90
10.11.0.3	Espectro armónico de la luminaria 11	91

11.1.0.1	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 1	94
11.1.0.2	Onda de corriente modelizada para la luminaria 1	94
11.2.0.1	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 2 (una luminaria)	95
11.2.0.2	Onda de corriente modelizada para la luminaria 2 (una luminaria)	95
11.2.0.3	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 2 (dos luminarias)	96
11.2.0.4	Onda de corriente modelizada para la luminaria 2 (dos luminarias)	96
11.3.0.1	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 3	97
11.3.0.2	Onda de corriente modelizada para la luminaria 3	97
11.4.0.1	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 4	98
11.4.0.2	Onda de corriente modelizada para la luminaria 4	98
11.5.0.1	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 5	99
11.5.0.2	Onda de corriente modelizada para la luminaria 5	99
11.6.0.1	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 6	100
11.6.0.2	Onda de corriente modelizada para la luminaria 6	100
11.7.0.1	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 7 (una luminaria)	101
11.7.0.2	Onda de corriente modelizada para la luminaria 7 (una luminaria)	101
11.7.0.3	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 7 (dos luminarias)	102
11.7.0.4	Onda de corriente modelizada para la luminaria 7 (dos luminarias)	102
11.8.0.1	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 8 (una luminaria)	103
11.8.0.2	Onda de corriente modelizada para la luminaria 8 (una luminaria)	103
11.8.0.3	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 8 (dos luminarias)	104
11.8.0.4	Onda de corriente modelizada para la luminaria 8 (dos luminarias)	104
11.9.0.1	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 9	105
11.9.0.2	Onda de corriente modelizada para la luminaria 9	105
11.10.0.1	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 10	106
11.10.0.2	Onda de corriente modelizada para la luminaria 10	106
11.11.0.1	Circuito equivalente paralelo para la luminaria 11	107
11.11.0.2	Onda de corriente modelizada para la luminaria 11	107

Índice de tablas

3.1.1.1	Efectos de los armónicos en las redes de distribución	23
4.3.0.1	Comparativa entre tipos de lámparas	29
5.1.0.1	Características de las luminarias estudiadas en laboratorio	30
5.3.0.1	Características de la luminaria 1	32
5.3.0.2	Parámetros de la luminaria 1	33
5.3.0.3	Armónicos de tensión y corriente de la luminaria 1	34
7.0.0.1	Valores de cada luminaria y valor medio del total	40
7.2.1.1	Resultados para transformador de 250 kVA	44
7.2.2.1	Resultados para transformador de 400 kVA	45
7.2.3.1	Resultados para transformador de 630 kVA	46
7.2.4.1	Resultados para transformador de 800 kVA	47
7.2.5.1	Tabla comparativa de todos los transformadores	47
8.3.0.1	Comparativa entre los distintos tipos de filtros	51
9.0.0.1	Tabla resumen comparativa de luminarias	55
10.0.0.1	Características de las luminarias estudiadas en laboratorio	59
10.1.0.1	Características de la luminaria 1	60
10.1.0.2	Parámetros de la luminaria 1	60
10.1.0.3	Armónicos de tensión y corriente de la luminaria 1	61
10.2.0.1	Características de la luminaria 2	62
10.2.0.2	Parámetros de la luminaria 2 (una luminaria)	63
10.2.0.3	Armónicos de la luminaria 2 (una luminaria)	64
10.2.0.4	Parámetros de la luminaria 2 (dos luminarias)	65
10.2.0.5	Armónicos de la luminaria 2 (dos luminarias)	66
10.3.0.1	Características de la luminaria 3	67
10.3.0.2	Parámetros de la luminaria 3	68
10.3.0.3	Armónicos de la luminaria 3	68
10.4.0.1	Características de la luminaria 4	69
10.4.0.2	Parámetros de la luminaria 4	70
10.4.0.3	Armónicos de la luminaria 4	71
10.5.0.1	Características de la luminaria 5	72

10.5.0.2	Parámetros de la luminaria 5	72
10.5.0.3	Armónicos de la luminaria 5	73
10.6.0.1	Características de la luminaria 6	74
10.6.0.2	Parámetros de la luminaria 6	75
10.6.0.3	Armónicos de la luminaria 6	75
10.7.0.1	Características de la luminaria 7	76
10.7.0.2	Parámetros de la luminaria 7 (una luminaria)	77
10.7.0.3	Armónicos de la luminaria 7 (una luminaria)	78
10.7.0.4	Parámetros de la luminaria 7 (dos luminarias)	79
10.7.0.5	Armónicos de la luminaria 7 (dos luminarias)	80
10.8.0.1	Características de la luminaria 8	81
10.8.0.2	Parámetros de la luminaria 8 (una luminaria)	81
10.8.0.3	Armónicos de la luminaria 8 (una luminaria)	82
10.8.0.4	Parámetros de la luminaria 8 (dos luminarias)	83
10.8.0.5	Armónicos de la luminaria 8 (dos luminarias)	84
10.9.0.1	Características de la luminaria 9	85
10.9.0.2	Parámetros de la luminaria 9	86
10.9.0.3	Armónicos de la luminaria 9	86
10.10.0.1	Características de la luminaria 10	87
10.10.0.2	Parámetros de la luminaria 10	88
10.10.0.3	Armónicos de la luminaria 10	89
10.11.0.1	Características de la luminaria 11	90
10.11.0.2	Parámetros de la luminaria 11	90
10.11.0.3	Armónicos de la luminaria 11	91

TÍTULO: **REPERCUSIÓN DEL USO DE LA TECNOLOGÍA CFL Y LED
DE ILUMINACIÓN EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN**

MEMORIA

PETICIONARIO: **ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: **JUNIO DE 2017**

AUTOR: **EL ALUMNO**

Fdo.: **ALBA CARBALLEIRA DEL POZO**

Índice del documento MEMORIA

1	Objeto	13
2	Alcance	14
2.1	Normas y referencias	15
2.1.1	Disposiciones legales y normas aplicadas	15
2.2	Bibliografía	15
2.3	Programas de cálculo	15
2.4	Otras referencias	16
3	Introducción y definición de conceptos	17
3.1	Calidad del Servicio Eléctrico	17
3.1.1	Armónicos	17
3.1.1.1	Definición	17
3.1.1.2	Conceptos básicos	18
3.1.1.3	Factores en la calidad del suministro	20
3.1.1.4	Efectos de los armónicos en la red de distribución	23
4	Sistemas de iluminación objeto de estudio	25
4.1	Lámparas LED	25
4.1.1	Descripción	25
4.1.2	Ventajas y desventajas	27
4.2	Lámparas de bajo consumo (CFL)	27
4.2.1	Descripción	27
4.2.2	Ventajas y desventajas	28
4.3	Comparativa entre distintos tipos de lámparas	29
5	Realización de medidas en laboratorio	30
5.1	Equipo de medición y software utilizado	30
5.2	Procedimiento	31
5.3	Resultados obtenidos	32
6	Modelización individual de las luminarias	36
6.1	Software y modelo utilizado	36
6.2	Resultados obtenidos	37
7	Efectos de las luminarias en conjunto	40
7.1	Comprobación del efecto de suma de corrientes armónicas	41
7.2	Estudio de la resonancia	41
7.2.1	Caso 1 - Transformador de 250 kVA	43
7.2.2	Caso 2 - Transformador de 400 kVA	44

7.2.3	Caso 3 - Transformador de 630 kVA	45
7.2.4	Caso 4 - Transformador de 800 kVA	46
7.2.5	Conclusiones	47
8	Soluciones para la reducción de distorsión armónica	49
8.1	Filtros pasivos	49
8.1.1	Filtros de rechazo	49
8.1.2	Filtros de absorción	50
8.2	Filtros activos	51
8.3	Comparativa	51
8.4	Diseño de un filtro de rechazo para un bloque de viviendas	52
9	Conclusiones	55

1 Objeto

El objeto de este proyecto es analizar el impacto que puede provocar en las redes de distribución la sustitución masiva del alumbrado tradicional por las denominadas lámparas de bajo consumo (CFL) y las lámparas de tipo LED.

2 Alcance

El proyecto abarca los siguientes puntos:

- Definición del concepto de Calidad del Servicio Eléctrico e ineficiencias presentes en la red de distribución provocadas por las luminarias a estudiar.
- Realización de medidas de diversas luminarias tipo LED y CFL para determinar algunas características como consumos de potencia, formas de onda y tasa de distorsión en corriente.
- Modelado de cada una de las luminarias medidas mediante la utilización de programas de simulación.
- Modelado y simulación del efecto provocado por las luminarias en la red de distribución, y estudio de las posibles resonancias que pueden surgir, así como la mitigación de las mismas.

2.1. Normas y referencias

2.1.1. Disposiciones legales y normas aplicadas

- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 50160 *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*. Madrid: AENOR, 2011.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE 61000-2-2 *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-2: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión*. Madrid: AENOR, 2003.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 61000-3-2 *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada menor o igual a 16 A por fase)*. Madrid: AENOR, 2010.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 61000-4-30 *Compatibilidad electromagnética (CEM). Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro*. Madrid: AENOR, 2009.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 61642 *Redes industriales de corriente alterna afectadas por armónicos - Aplicación de filtros y de condensadores estáticos de corrección*. Madrid: AENOR, 2000.

2.2. Bibliografía

- [1] MATVOZ, D. ; *Comparison of LED and CFL Lamps and Their Impact on Electric Power Network*. IEEE (2012).
- [2] WEI, Z. ; *Modelling of Compact Fluorescent Lamps*. IEEE (2008).
- [3] R WATSON, N. ; *Implications for Distribution Networks of High Penetration of Compact Fluorescent Lamps*. IEEE (2009).
- [4] MONTAÑANA ROMEU, J. ; *Modelos equivalentes de PSPICE de lámparas de bajo consumo comerciales*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [5] S KOCH, A. ; *Harmonics and Resonances in the Low Voltage Grid Caused by Compact Fluorescent Lamps*. IEEE (2010).

2.3. Programas de cálculo

- TECNIXCENTER TEAM. TECnixCenter 2.0 [software]. Editor utilizado para el tratamiento de textos en formato LaTeX.

- CHRISTIAN SCHENK. MiKTeX 2.9 [software]. Compilador de texto en formato LaTeX.
- MICROSOFT. Microsoft Excel 2010 [software]. Santa Rosa [California]. Microsoft, 2010. utilizado para la confección de tablas de cálculos y obtención de resultados.
- CHAUVIN. PAT-PAT2 v.4.4.2 [software]. Empleado para descarga de datos de mediciones de luminarias con el analizador de redes C.A 8331.
- OrCAD Capture Cis v.17.2-2016 [software]. Empleado para el diseño de los circuitos equivalentes de las luminarias.
- PSPICE A/D LITE v.17.2-2016 [software]. Empleado para realizar la modelización de las luminarias.
- MATHWORKS. Matlab-Simulink [software]. Empleado para realizar la comprobación de resonancia en paralelo para los centros de transformación.

2.4. Otras referencias

- [i] *Energía Eléctrica*, Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, [Consulta 7 marzo 2017]. Disponible en: <http://www.minetad.gob.es/energia/electricidad/CalidadServicio/Paginas/IndexCalidad.aspx>
- [ii] *Armónicos eléctricos*. Circutor Formación. [Consulta 8 marzo 2017]. Disponible en: <http://circutor.es/es/formacion/armonicos-electricos>
- [iii] *Los Armónicos y la Calidad de la Energía Eléctrica*. RTR Energía. [Consulta 9 marzo 2017]. Disponible en: http://www.rtrenergia.es/downloads/armonicos_2012.pdf
- [iv] *Los cinco elementos que distinguen una luminaria LED de alta calidad*, Ledia group, [Consulta 12 marzo 2017]. Disponible en: <http://lediagroup.com/tecnologia-led/los-cinco-elementos-que-distinguen-una-luminaria-led-de-alta-calidad/>
- [v] *Diseción de una lámpara de bajo consumo*, Afinidad Eléctrica, [Consulta 12 marzo 2017]. Disponible en: <http://www.afinidadelectrica.com/articulo.php?IdArticulo=133>
- [vi] *Tabla comparativa de diferentes características entre lámparas LEDs. CFLs e Incandescentes*, Led4us, [Consulta 12 marzo 2017]. Disponible en: <https://www.led4us.es/especificaciones-tecnicas-de-los-leds>

3 Introducción y definición de conceptos

3.1. Calidad del Servicio Eléctrico

Se entiende por Calidad del Servicio Eléctrico el conjunto de características, técnicas y comerciales, referidas al suministro eléctrico y exigibles por los consumidores y los órganos competentes de la Administración [i].

Se incluye la continuidad del suministro (considerando duración y número de interrupciones), calidad (referida a las características de onda de la tensión) y calidad en atención al cliente.

La norma UNE-EN-50160 establece las características de tensión y los aspectos negativos de la calidad del suministro, entre los cuales está la distorsión armónica. Dicha distorsión es provocada, entre otros elementos, por las lámparas objeto de estudio de este trabajo.

Estas perturbaciones provocan un deterioro en la calidad del servicio eléctrico, por lo que será importante analizar y mitigar sus efectos en la red.

3.1.1. Armónicos

3.1.1.1. Definición

Se definen los armónicos como tensiones o corrientes sinusoidales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual opera el sistema de alimentación. Esto provoca distorsiones en las ondas sinusoidales, que a su vez generan ineficiencias y problemas en la red eléctrica. Se pueden representar con la siguiente fórmula en las ecuaciones 3.1.1.1 y

3.1.1.2:

$$v(t) = U_0 + \sum_{h=1}^H U_h * \sqrt{2} \sin(h\omega t - \alpha h) \quad (3.1.1.1)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{h=1}^H I_h * \sqrt{2} \sin(h\omega t - \beta h) \quad (3.1.1.2)$$

Siendo:

- $\omega = 2\pi * f_0$, y f_0 la frecuencia fundamental de red (50 Hz).
- U_0 e I_0 componentes de continua de tensión y corriente.

- U_h e I_h valor eficaz de tensión y corriente del armónico h .
- α y β los ángulos de tensión y corriente de los armónicos.
- H valor determinado por la frecuencia de muestreo para una señal discreta.

Esta distorsión en la onda de tensión o corriente es generada por las características no lineales de cargas de un sistema de potencia, en este caso los componentes electrónicos de las lámparas LED y CFL que producen corrientes distorsionadas y pueden modificar la forma de onda sinusoidal original de la tensión, lo que se observa en la figura 3.1.1.1, obtenida de la referencia [iii].

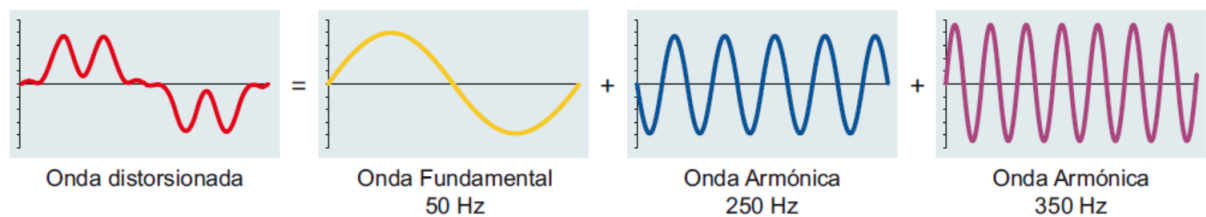


Figura 3.1.1.1 – Forma de onda de componente fundamental y armónicos

3.1.1.2. Conceptos básicos

Hay diversos parámetros para tener en cuenta en el estudio de los armónicos, entre los cuales se encuentran los siguientes [iii]:

Orden de un armónico (n)

El orden de un armónico es el número entero que determina la relación de la frecuencia del armónico frente a la fundamental.

$$n = \frac{f_n}{f_{50}} \quad (3.1.1.3)$$

Siendo n el orden del armónico y f_{50} la frecuencia fundamental de 50 Hz anteriormente mencionada. Los armónicos más importantes para el estudio por ser los más presentes en las redes serán los armónicos de orden impar (3,5,7, etc.).

Componente fundamental

Es la componente sinusoidal de orden 1 (de tensión o corriente) del desarrollo en serie de Fourier, de frecuencia igual a la onda periódica original.

Componente armónica

Componente sinusoidal de orden superior a 1 (de tensión o corriente) del desarrollo en serie de Fourier, de frecuencia múltiplo entero de la frecuencia de origen.

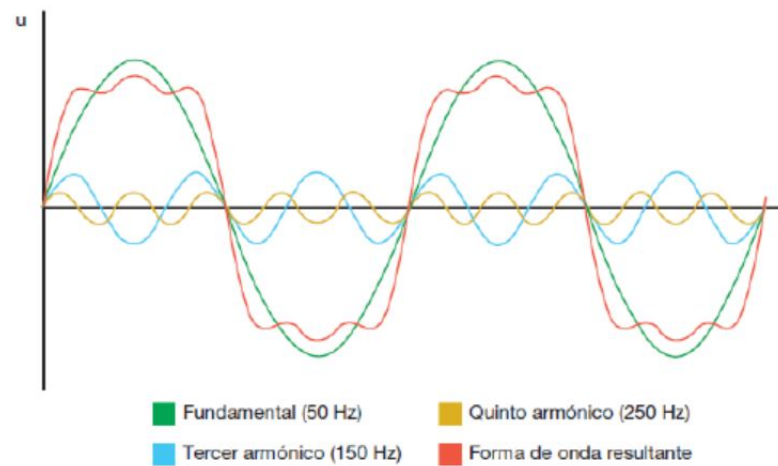
Frecuencia de un armónico (f)

Es el resultado de multiplicar el orden del armónico por la frecuencia fundamental. Por ejemplo para el tercer armónico se obtendría este resultado:

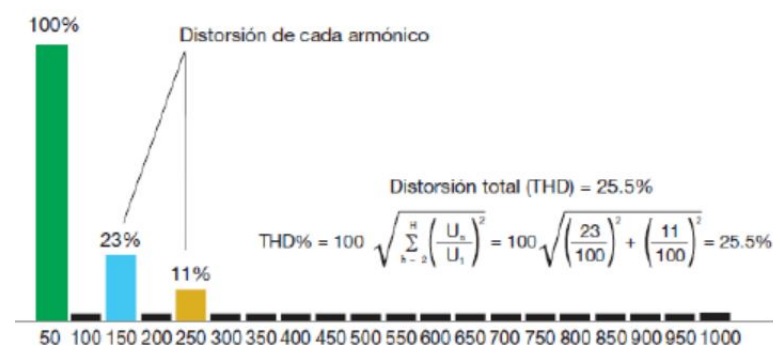
$$f_3 = 3 * 50 = 150Hz \quad (3.1.1.4)$$

Espectro armónico

Es la descomposición de una señal en sus armónicos, en el dominio de la frecuencia. Se representa con un diagrama de barras en el cual en el eje horizontal se observa el orden de cada armónico, y en el eje vertical el porcentaje de cada una de esas señales armónicas. En la figura 3.1.1.2 se muestra una onda distorsionada con su correspondiente gráfico de barras de espectro armónico.



(a) Onda distorsionada



(b) Espectro armónico

Figura 3.1.1.2 – Espectro armónico

3.1.1.3. Factores en la calidad del suministro

Tasa de distorsión individual

Se define para un armónico de orden n , como la relación en % entre el valor eficaz de tensión o corriente armónica (U_n o I_n) y el valor de la componente fundamental (U_1 e I_1), y se expresa con las siguientes fórmulas:

$$U_n(\%) = \frac{U_n}{U_1} * 100 \quad (3.1.1.5)$$

$$I_n(\%) = \frac{I_n}{I_1} * 100 \quad (3.1.1.6)$$

Residuo armónico (RA)

Es el valor eficaz de todos los armónicos de una magnitud distorsionada, descontando la contribución del armónico fundamental.

$$RA = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} = \sqrt{U^2 - U_1^2} \quad (3.1.1.7)$$

Tasa total de distorsión (THD)

Relación entre el valor eficaz del residuo armónico de tensión o corriente y el valor de la componente fundamental.

$$THD(U)\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} U_n^2}}{U_1} * 100 \quad (3.1.1.8)$$

- Una tasa de distorsión en tensión inferior al 5 % es considerada correcta, con poco riesgo de mal funcionamiento.
- Si el valor está entre el 5-8 % indica existencia de una distorsión armónica significativa.
- Si supera el 8 % se habla de una distorsión considerable, con malos funcionamientos probables y necesidad de analizar y atenuar los problemas generados.

$$THD(I)\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_1} * 100 \quad (3.1.1.9)$$

- En cuanto a la tasa de distorsión en corriente, se considera normal si es inferior al 10 %.
- Si el valor está entre el 10-50 % la distorsión es considerable y existe riesgo de aumento de temperatura.
- Si supera el 50 % la distorsión es importante, siendo necesario un análisis y propuestas para la atenuación de los problemas.

Potencia activa

En una señal distorsionada, la potencia activa es la suma de todas las potencias activas, considerando corrientes y tensiones del mismo orden.

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h \quad (3.1.1.10)$$

En donde φ_h es el desfase entre la tensión e intensidad del armónico de orden h.

Potencia de distorsión

Se considera la potencia aparente en un sistema sin distorsión:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (3.1.1.11)$$

Sin embargo, en presencia de armónicos tiene que realizarse el cálculo de otra manera, ya que no se cumple que la potencia aparente es igual a la raíz cuadrada de la suma de la potencia activa al cuadrado y la potencia reactiva al cuadrado. Por tanto, se obtiene lo siguiente:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.1.1.12)$$

En donde ese nuevo factor en la ecuación es la potencia de distorsión D. Se representa gráficamente en la figura 3.1.1.3

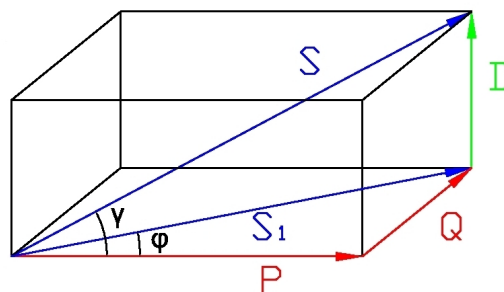


Figura 3.1.1.3 – Representación gráfica de la potencia de distorsión

- P es la potencia activa.
- Q es la potencia reactiva.
- D es la potencia de distorsión.
- S₁ es la potencia aparente de la componente fundamental, sin considerar la distorsión.
- S es la nueva potencia aparente, teniendo en cuenta la potencia de distorsión.

Factor de potencia

Se define como la relación entre la potencia activa P y la potencia aparente S . En el caso de trabajar con ondas sinusoidales, el factor de potencia coincide con el \cos_φ , pero al tratarse de ondas distorsionadas son dos conceptos diferentes. El factor de potencia se refiere a todas las componentes mientras que el \cos_φ comprende solo la componente fundamental.

$$FP = P/S \quad (3.1.1.13)$$

$$\cos_\varphi = P_1/S_1 \quad (3.1.1.14)$$

Por tanto, el hecho de que el factor de potencia sea inferior al \cos_φ en una medición, es un indicativo de presencia de armónicos en ese sistema y permite evaluar el sobredimensionado que se debe aplicar a la alimentación de una instalación.

3.1.1.4. Efectos de los armónicos en la red de distribución

La existencia de armónicos en las redes de distribución provoca diversos efectos sobre distintos elementos, presentados en la tabla 3.1.1.1 obtenida de [ii].

Elemento	Problemas	Efectos
<i>Conductor</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la corriente • Aumento de la resistencia • Aumento de pérdidas térmicas por efecto Joule • Efecto Skin 	<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento de cables y deterioro de los mismos • Disparos de protecciones
<i>Conductor de neutro</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Circulación de armónicos múltiplos de tres • Retorno de los armónicos por el conductor de neutro 	<ul style="list-style-type: none"> • Sobreintensidad de corriente en el neutro • Calentamiento del conductor y degradación • Tensión neutro-tierra • Disparo de protecciones
<i>Condensadores</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Resonancia en paralelo con el sistema por disminución de impedancia de condensadores • Amplificación de armónicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento y deterioro, envejecimiento prematuro • Destrucción del elemento
<i>Máquinas eléctricas</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente armónica circulando por los devanados y tensiones armónicas en bordes 	<ul style="list-style-type: none"> • Sobrecalentamiento y pérdida de aislamiento térmico (efecto Joule) • Aumento pérdidas magnéticas • Disminución del rendimiento • Desclasificación (transformadores) • Vibraciones en eje, desgaste mecánico en rodamientos, reducción del par y excentricidades (motores)
<i>Equipos de medida y control</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Medidas no válidas • Errores en procesos de control 	<ul style="list-style-type: none"> • Valores de magnitudes incorrectos • Interferencias con sistemas de comunicación y control • Errores en instantes de disparo de tiristores

Tabla 3.1.1.1 – Efectos de los armónicos en las redes de distribución

Estos efectos sobre los elementos provocan diversos costes, se puede diferenciar entre:

- **Costes técnicos:** Implican una pérdida de rendimiento, se refieren a las sobrecargas de máquinas, pérdida de capacidad en las líneas de distribución, caídas de tensión, pérdidas por efecto Joule en líneas y máquinas y pérdidas magnéticas en máquinas eléctricas.
- **Costes económicos:** Son cuantificables de manera económica, aunque en ciertos casos es complicado. A su vez se pueden considerar costes visibles y costes ocultos.

Los costes visibles comprenden un mayor consumo eléctrico, además de grandes puntas de consumo y un recargo por energía reactiva.

Los costes ocultos implican pérdidas de distribución, pérdidas de potencia y energía (efecto Joule y magnéticas); necesidad de ampliación y también sobredimensionado de instalaciones y paradas de procesos productivos.

4 Sistemas de iluminación objeto de estudio

En el trabajo se estudiarán dos tipos de luminarias, LED y CFL (bajo consumo), cuyo uso provoca en la red los efectos anteriormente mencionados. Se describirán sus características y ventajas y desventajas de cada una de ellas en los siguientes apartados.

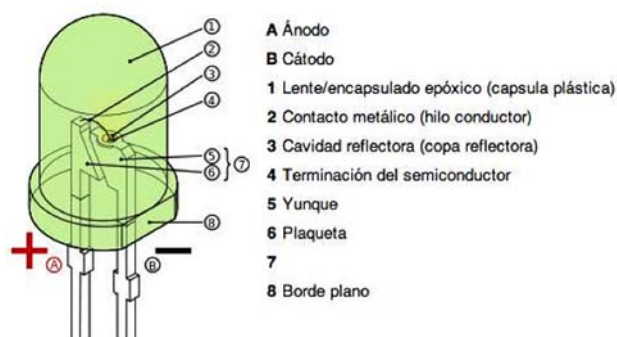
4.1. Lámparas LED

4.1.1. Descripción

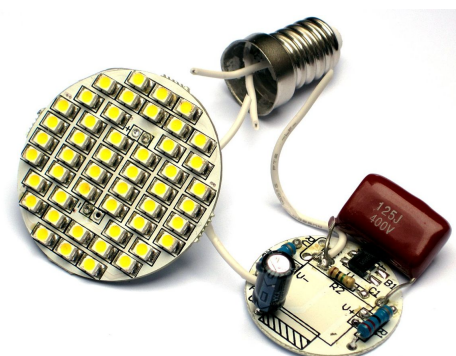
Una lámpara LED es una lámpara que utiliza leds como fuente lumínica. Como la luz que emite un led no es demasiado intensa, las lámparas están compuestas por agrupaciones de led para alcanzar una intensidad luminosa similar a otros tipos de lámparas. Sus componentes [iv] son los siguientes:

Chip

Se define un led (Light Emitting Diode) como un diodo formado por superposición de varias capas de material semiconductor (suele ser carburo de silicio) capaz de emitir una radiación electromagnética en forma de luz si es polarizado correctamente. Para proteger el chip del exterior se encapsula en una carcasa de cristal o policarbonato. Su aspecto y estructura se pueden ver en la figura 4.1.1.1. Una lámpara estará compuesta de diversos leds, que también se muestran en la figura.



(a) Partes de un diodo LED



(b) Partes de una lámpara LED

Figura 4.1.1.1 – Lámpara y diodo LED

Driver o fuente de alimentación

Los LED necesitan una fuente de alimentación para poder conectarse a la red, ya que trabajan en corriente continua. Además, adapta el voltaje de salida para las necesidades del LED, debido a las tensiones tan bajas con las que trabajan. Por tanto, del driver dependerá en gran medida el aprovechamiento de energía eléctrica consumida por la lámpara.

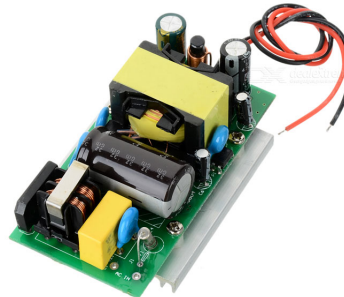


Figura 4.1.1.2 – Estructura de un Driver LED

Disipador de calor

Es necesario debido al calor generado por el led, para evitar pérdidas de energía que, además de degradar el chip, afectan al color y calidad de la luz. Es también importante la carcasa exterior, para que su estructura favorezca la disipación de calor. Suelen utilizarse materiales como aluminio o magnesio. Un ejemplo es el presente en la figura 4.1.1.3.



Figura 4.1.1.3 – Disipador de calor para lámpara LED

Componente óptico

Se utiliza en las lámparas LED, debido a que este tipo de diodos emiten la luz de forma unidireccional. Es un conjunto de lentes exteriores que permiten proporcionar un ángulo de difusión mayor o menor según las necesidades de distribución de luz requeridas. Se puede ver un tipo de óptica de este estilo en la figura 4.1.1.4.

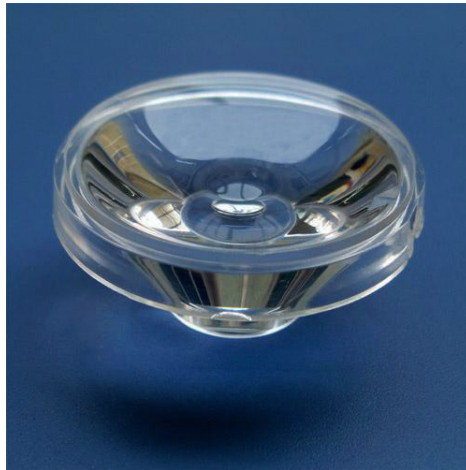


Figura 4.1.1.4 – Componente óptico para lámpara LED

4.1.2. Ventajas y desventajas

Las ventajas que presentan las lámparas LED frente a otros sistemas son las siguientes:

- Presentan un bajo consumo de potencia, lo que se traduce en un ahorro energético de hasta un 85-90 % frente a lámparas incandescentes.
- Larga duración, superando las 50.000 horas.
- Protección del medio ambiente y la salud, ya que no generan infrarrojos ni luz ultravioleta.
- El color del led se determina con el material base, por lo que no se necesitan filtros.
- Las lámparas LED se pueden encender y apagar a altas frecuencias, en menos de 100ns.
- No contienen mercurio ni elementos tóxicos.
- Son resistentes a vibraciones, y precisan un bajo mantenimiento.

Sin embargo, tienen algunas desventajas:

- Funcionamiento en corriente continua, por lo que requieren un driver para poder trabajar conectadas a la red eléctrica. Este sistema es el que inyecta corrientes armónicas en la red.
- Su eficiencia desciende con altas temperaturas.
- Precio más elevado en comparación con otro tipo de lámparas.

4.2. Lámparas de bajo consumo (CFL)

4.2.1. Descripción

Las lámparas fluorescentes compactas o CFL presentan una tecnología similar a la de los tubos fluorescentes, con la diferencia de que su consumo es menor (utilizan entre un 50-80 %

menos de energía para producir la misma cantidad de luz), son frías y tienen una duración mayor.

Funcionan con un balasto electrónico que, al fluir la corriente alterna por él, la convierte en corriente continua mediante un rectificador. A continuación un circuito oscilador origina una corriente alterna con una frecuencia muy elevada, para disminuir el parpadeo que se genera en este tipo de lámparas al estar encendidas. Del mismo modo que en las lámparas LED, estos componentes electrónicos serán los que generen los armónicos que serán inyectados en la red eléctrica. Los componentes internos y externos se muestran en la imagen 4.2.1.1, obtenida en [v].

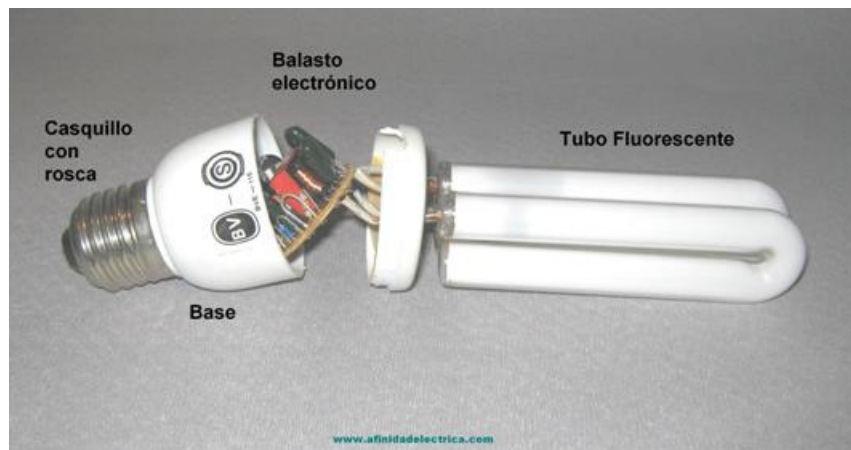


Figura 4.2.1.1 – Componentes de una lámpara CFL

4.2.2. Ventajas y desventajas

Este tipo de lámparas presentan las siguientes ventajas frente a los tubos fluorescentes y bombillas incandescentes tradicionales:

- Ahorro energético de un 50-80 % frente a una bombilla incandescente para producir la misma cantidad de luz.
- Duración superior a bombillas incandescentes.
- Son frías, por lo que gran parte de la energía que consumen la convierten en luz.
- Tamaño más reducido.

Sin embargo, también hay algunas desventajas:

- Precio más elevado que las bombillas incandescentes.
- Necesidad de reciclaje con tratamiento de residuos peligrosos por contener elementos tóxicos.
- Los ciclos de encendido y apagado afectan su vida útil, de forma que pueden durar menos de lo estimado.

- Requieren de un tiempo de encendido relativamente alto (alrededor de 40-50 segundos) para alcanzar la intensidad lumínica suficiente.

4.3. Comparativa entre distintos tipos de lámparas

En la siguiente tabla [vi] se pueden observar las distintas características de lámparas LED, CFL e incandescentes.

CARACTERÍSTICAS	LED	CFL	Incandescentes
Ciclos encendido/apagado	Indefinido	Acorta vida útil	Indefinido
Tiempo encendido	Instantáneo	Retardo	Instantáneo
Emisión de calor	Muy baja	Baja	Alta
Consumo eléctrico	Bajo	Bajo	Alto
Eficiencia	Alta	Alta	Baja
Sensibilidad baja temperatura	Ninguna	Alta	Poca
Materiales tóxicos	Ninguno	Mercurio	Ninguno
Vida útil	50000 h	10000 h	1000 h
Precio	Alto	Medio	Bajo

Tabla 4.3.0.1 – Comparativa entre tipos de lámparas

Finalmente, se muestra una imagen en la cual se compara el porcentaje de la energía consumida que se transforma en luz para cada tecnología de lámpara:

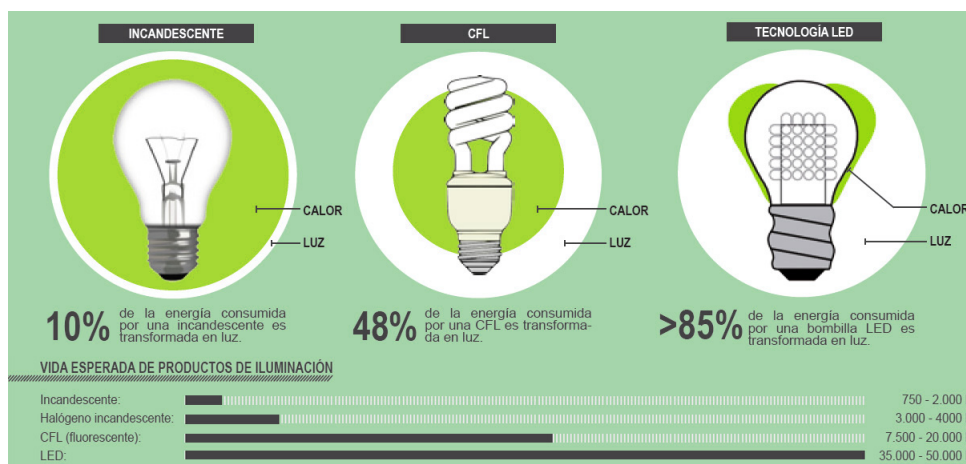


Figura 4.3.0.1 – Porcentaje de energía transformada en luz según tipo de lámpara

Como se puede observar, la tecnología LED y CFL presenta grandes ventajas frente a los sistemas de iluminación convencionales. Por lo tanto, el cambio de iluminación de los sistemas actuales por los de este tipo es recomendable en lo que se refiere a eficiencia energética.

Si dicho proceso se va llevando a cabo, los armónicos provocados acabarían afectando a mayor escala a los conductores y máquinas de las redes de distribución, por lo que es necesario encontrar una forma de reducirlos o eliminarlos, y para ello es importante estudiar las perturbaciones y caracterizar sus parámetros básicos para saber cómo tratarlas.

5 Realización de medidas en laboratorio

El primer paso a llevar a cabo en el presente trabajo ha sido la realización de medidas de características de diversas lámparas de tipo LED y CFL, para así observar su comportamiento al estar conectadas a la red eléctrica.

5.1. Equipo de medición y software utilizado

El primer paso es la obtención de información sobre cada una de las bombillas a medir. Esto se hace utilizando los datos presentes en las cajas, y confeccionando la siguiente tabla 5.1.0.1.

Luminaria	Tipo	Marca	Potencia (W)	Lúmenes	Duración	Calificación energética
1	LED	Lexman	12	1055	>15000 on/off	A+
2	LED	MegaLed	6	600	15 años	A+
3	LED	Led	6	400	>10000 on/off	A+
4	LED	Philips	11	1055	15000 h	A+
5	LED	Roblan	10	806	25000 h	A+
6	LED	H2V	9	806	<15000 on/off	A+
7	CFL	Lexman	23	1398	10000 h	A
8	CFL	Lexman	22	1297	6000 h	A
9	CFL	Froiz	11	600	8000 h	A
10	CFL	Froiz	9	450	8000 h	A
11	CFL	Lexman	15	800	6000 h	A

Tabla 5.1.0.1 – Características de las luminarias estudiadas en laboratorio

Para medir los valores de las potencias y los armónicos generados por cada una de las bombillas, se ha utilizado un analizador de redes C.A. 8331 de la marca Chauvin, que se puede observar en la siguiente imagen.

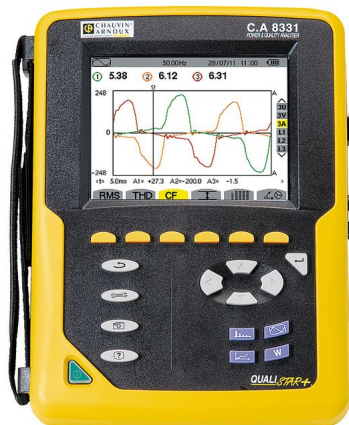


Figura 5.1.0.1 – Analizador C.A. 8331

Dicho analizador funciona con el software gratuito de la propia marca, por lo que se utiliza el programa PAT 2, que permite descargar mediante usb los datos obtenidos en el analizador a un ordenador y trabajar fácilmente con ellos exportándolos a una hoja Excel. En la imagen 5.1.0.2 se muestra la pantalla principal de este programa.

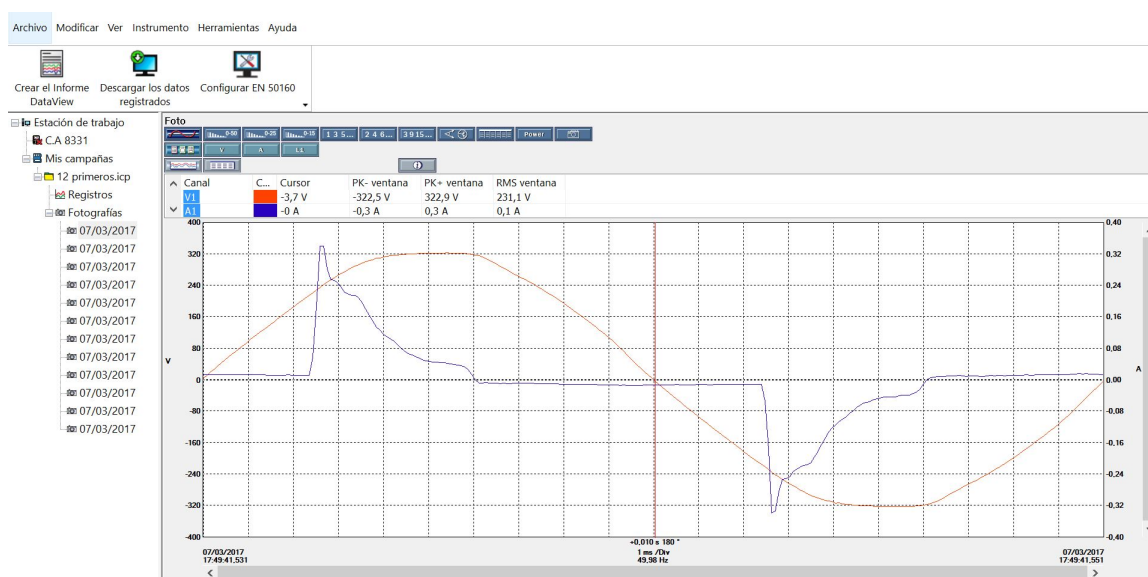


Figura 5.1.0.2 – Captura de pantalla del software utilizado para descargar los datos

5.2. Procedimiento

Para la obtención de las medidas se realiza el siguiente montaje:

- Se conecta la lámpara correspondiente a la red de forma monofásica, cableando fase y neutro en el terminal correspondiente.
- Se proporciona la referencia de tensión al analizador de redes y se coloca una pinza amperimétrica en el cable conectado a la fase de la bombilla.

- Se realiza una captura que se guarda en su memoria para descargar a un ordenador posteriormente.

Esto se puede observar en la siguiente figura:



Figura 5.2.0.1 – Montaje realizado para la obtención de medidas en laboratorio

5.3. Resultados obtenidos

En este apartado se muestra un ejemplo de los datos recabados tras la realización de las medidas de las diversas luminarias, en este caso para la luminaria 1 cuyas características se muestran en la tabla 5.3.0.1 y su fotografía en la figura 5.3.0.1.

El resto de resultados obtenidos y cálculos realizados se mostrarán en el correspondiente anexo.

Luminaria	1
Tipo	LED
Marca	Lexman
Potencia (W)	12
Lúmenes	1055
Duración	>15000 on/off
Calificación energética	A+

Tabla 5.3.0.1 – Características de la luminaria 1



Figura 5.3.0.1 – Luminaria 1

Con los datos obtenidos con el analizador, se muestra en la figura 5.3.0.2 la forma de onda de esta luminaria, y también sus parámetros en la tabla correspondiente.

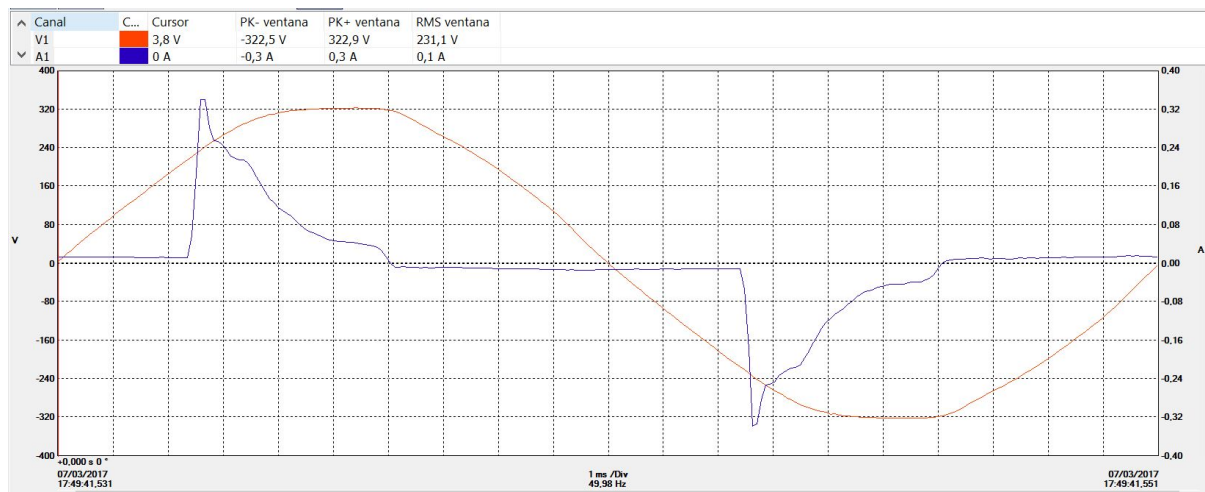


Figura 5.3.0.2 – Forma de onda de la luminaria 1

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	231
A rms	A	0,092
F	Hz	49,98
V THDr	% r	1,5
A THDr	% r	72,1
φ	°	-35
P (W)	W	12,22
Q (var)	var	-8,399
D (var)	var	15,37
S (VA)	VA	21,36
PF		0,572
Cos φ (DPF)		0,822

Tabla 5.3.0.2 – Parámetros de la luminaria 1

Como se puede observar, realmente la potencia consumida por la luminaria en este caso es un poco superior a la especificada en las características del fabricante.

También se puede observar que aparece una potencia de distorsión, además de la potencia activa y reactiva presentes en la tabla.

Esto da lugar a una elevada tasa de distorsión total en corriente, del 72,1 %, y un factor de potencia de 0,572 bastante reducido, que indica una presencia considerable de armónicos. Dichos armónicos se muestran en la siguiente tabla, presentando además un gráfico de barras en la figura 5.3.0.3 con el espectro de los armónicos impares de corriente.

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	% f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	231,1	0	1	100	0,064	0	26	0,1	0,000064	150
2	0	0	---	2	0,1	0,000064	-109	27	10	0,0064	23
3	0,3	0,6933	171	3	70,4	0,045056	161	28	0	0	---
4	0	0	---	4	0,1	0,000064	-45	29	8,1	0,005184	-139
5	0,6	1,3866	131	5	44,5	0,02848	-14	30	0,1	0,000064	-159
6	0	0	---	6	0,2	0,000128	68	31	7,8	0,004992	62
7	1,2	2,7732	48	7	35,7	0,022848	-176	32	0	0	---
8	0	0	---	8	0,3	0,000192	-134	33	6,5	0,00416	-102
9	0,4	0,9244	-167	9	28,3	0,018112	8	34	0	0	---
10	0	0	---	10	0,4	0,000256	36	35	5,3	0,003392	111
11	0,2	0,4622	29	11	16,5	0,01056	-154	36	0,1	0,000064	135
12	0	0	---	12	0,5	0,00032	-154	37	6,1	0,003904	-44
13	0,2	0,4622	128	13	15	0,0096	67	38	0,1	0,000064	-33
14	0	0	---	14	0,4	0,000256	5	39	6,1	0,003904	148
15	0,1	0,2311	-130	15	14,5	0,00928	-101	40	0,1	0,000064	143
16	0	0	---	16	0,1	0,000064	180	41	5,4	0,003456	-10
17	0	0	---	17	10,7	0,006848	104	42	0	0	---
18	0	0	---	18	0	0	---	43	5,5	0,00352	-170
19	0	0	---	19	11,8	0,007552	-45	44	0	0	---
20	0	0	---	20	0	0	---	45	5	0,0032	25
21	0	0	---	21	11,5	0,00736	147	46	0,1	0,000064	49
22	0	0	---	22	0,1	0,000064	178	47	4,6	0,002944	-131
23	0	0	---	23	9,7	0,006208	-11	48	0,1	0,000064	-132
24	0	0	---	24	0,1	0,000064	-32	49	4,8	0,003072	67
25	0	0	---	25	10,5	0,00672	-168	50	0,1	0,000064	61

Tabla 5.3.0.3 – Armónicos de tensión y corriente de la luminaria 1

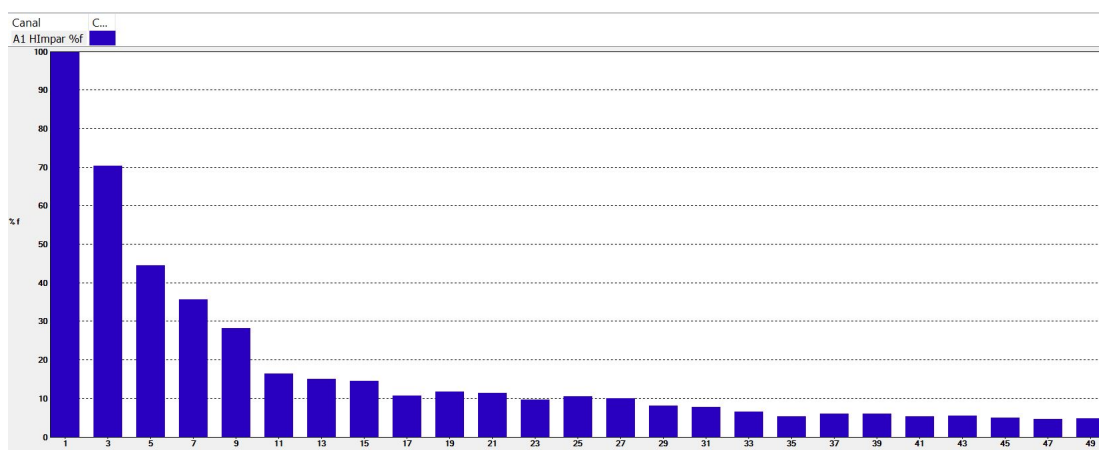


Figura 5.3.0.3 – Espectro armónico de la luminaria 1 (Armónicos impares de corriente)

Se puede comprobar que se cumple lo siguiente respecto a la potencia de distorsión:

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (5.3.0.1)$$

En este caso y cogiendo por ejemplo los primeros 25 armónicos y considerando los de orden impar (los de orden par son muy pequeños), obtenemos este resultado:

$$D = 231,1 * \sqrt{(0,045056^2) + (0,02848^2) + (0,022848^2) + \dots} = 15,0176VAr \quad (5.3.0.2)$$

Este valor corresponde a la potencia de distorsión calculada por el analizador de redes y presentada en la tabla 5.3.0.2, que es de 15,37 VAr

Otra manera de calcular la potencia de distorsión sería la siguiente, de la ecuación 5.3.0.3:

$$D = \sqrt{(S^2) - (P^2) - (Q^2)} \quad (5.3.0.3)$$

Por ejemplo, para esta luminaria Lexman LED el cálculo sería el siguiente:

$$D = \sqrt{(21,36^2) - (12,22^2) - (8,399^2)} = 15,37VAr \quad (5.3.0.4)$$

Se observa que el resultado de la ecuación 5.3.0.4 es idéntico a los 15.37 VAr obtenidos con el analizador de redes y mostrados en la tabla de parámetros de la luminaria, incluso más aproximado que el cálculo anterior.

Estos cálculos se determinarán para las demás luminarias estudiadas en el trabajo, de forma que se tengan distintos valores para comparar diferentes fabricantes y modelos, y el resto de datos se presentarán en el Anexo de Realización de medidas en laboratorio.

6 Modelización individual de las luminarias

Una vez recogidos los datos utilizando el analizador de redes, se procede a la modelización de las luminarias de forma individual, para tener un circuito equivalente que se pueda estudiar para posibles propuestas de mejora de los componentes o reducción de los armónicos.

6.1. Software y modelo utilizado

Esta modelización se realizará con el programa OrCAD-Pspice, cuya pantalla principal se muestra en la siguiente imagen:

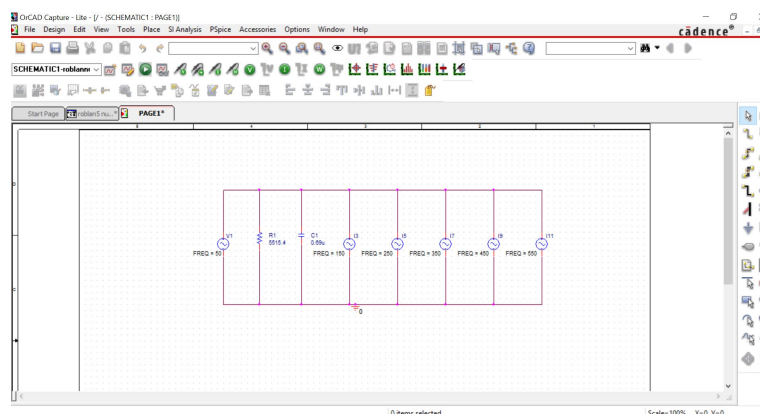


Figura 6.1.0.1 – Pantalla principal del programa OrCAD capture

Este programa permite diseñar diferentes circuitos eléctricos. En este caso se realiza el circuito equivalente en paralelo de cada una de las luminarias, con los siguientes parámetros, que se han obtenido mediante el analizador de redes.

- Una fuente de tensión a la frecuencia fundamental y con el valor de la tensión de red que será alrededor de 230V, en este caso multiplicado por 1,4142 porque el programa pide el valor máximo y el analizador proporciona el valor eficaz.
- Una resistencia cuyo valor se obtiene según esta fórmula, dividiendo la tensión a la que se ha realizado la medida elevada al cuadrado, entre la potencia activa obtenida con el analizador [4].

$$R = V_1^2 / P \quad (6.1.0.1)$$

- Un condensador (ya que las luminarias son capacitivas) que se calcula con esta fórmula, utilizando la potencia reactiva y a frecuencia fundamental [4].

$$C = Q/(\omega * V_1^2) \quad (6.1.0.2)$$

- Una fuente de corriente para cada uno de los armónicos, con el valor correspondiente de corriente (obtenido de las tablas de armónicos y multiplicado de nuevo por 1,4142) y la frecuencia para el orden de cada armónico. En este caso se han elegido los armónicos impares hasta el número 11, ya que se considera que el resto pueden ser despreciables a la hora de realizar la modelización, y la forma de onda es bastante correcta.

6.2. Resultados obtenidos

Todo este circuito explicado anteriormente se muestra representado en el OrCAD capture con la siguiente figura 6.2.0.1, tomando como ejemplo la luminaria 1 Lexman LED.

Los parámetros de la resistencia y el condensador serán los siguientes en este caso:

$$R = 231,1^2/12,22 = 4370\Omega \quad (6.2.0.1)$$

$$C = 8,399/(2 * \pi * 50 * 231,1^2) = 0,5\mu F \quad (6.2.0.2)$$

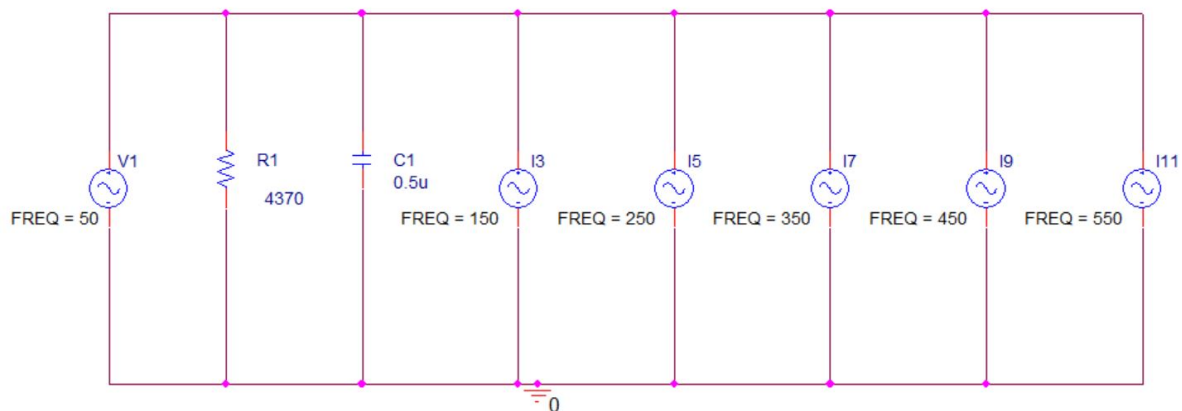


Figura 6.2.0.1 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 1

Una vez dibujado todo el circuito, se realiza la simulación, comprobando que no existan errores, que serían mostrados por el programa.

En la pantalla de Pspice con la simulación se traza la Intensidad en sentido contrario a la que pasa por la fuente de tensión, obteniéndose la forma de onda correspondiente que se muestra en la figura 6.2.0.2.

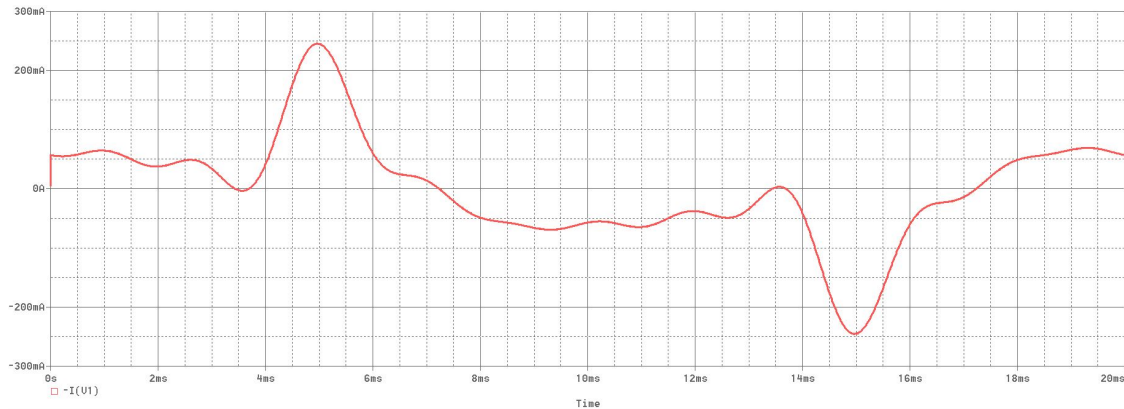
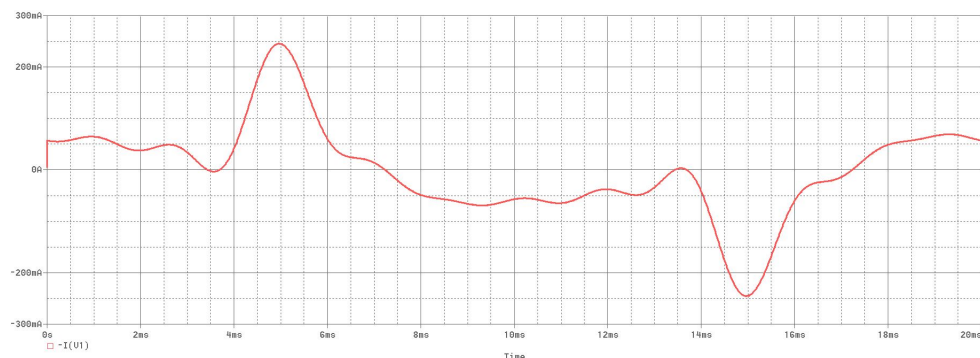
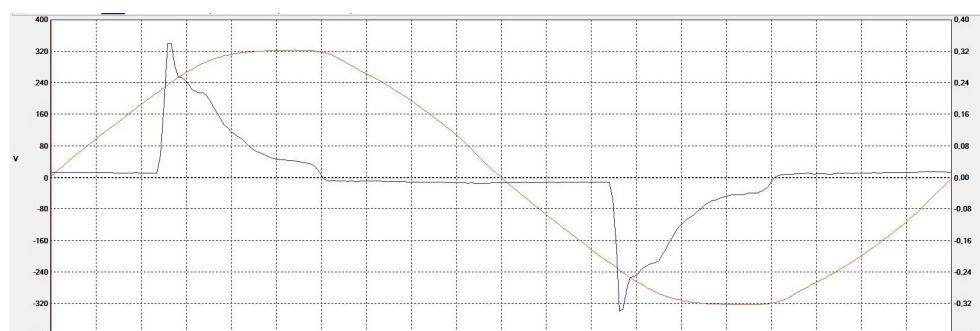


Figura 6.2.0.2 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 1

Al utilizar menos armónicos para resumir el circuito equivalente, la forma de onda no es exactamente igual a la obtenida con el analizador (este toma hasta el armónico 50), pero se puede considerar que es válida y bastante parecida. En la siguiente figura 6.2.0.3 se muestra la comparativa entre esta onda y la forma de onda que se había obtenido con el analizador, para poder ver la similitud.



(a) Onda de corriente modelizada para la luminaria 1



(b) Onda de corriente obtenida con el analizador para la luminaria 1

Figura 6.2.0.3 – Comparativa entre ambas ondas de corriente

Aunque la onda modelizada no presenta la misma forma que la original, ni los mismos picos, esto se debe a que sería complicado hacer una simulación de la onda real como la que capta el analizador, ya que tendrían que evaluarse los armónicos hasta el de orden 50. Sin embargo, los valores de pico de la onda son bastante aproximados a los reales, y para tener

un ejemplo del circuito equivalente se considera suficiente.

La realización de esta modelización permite tener los parámetros de cada luminaria para poder tratar los datos como sea necesario, y posteriormente poder realizar en otros apartados modelizaciones de instalaciones completas con muchas de estas luminarias conectadas. Así se pueden estudiar sus efectos a mayor escala, ya que serán más importantes.

El ejemplo mostrado es el de la luminaria 1 de la marca Lexman LED, presentándose el resto de modelizaciones en su anexo correspondiente.

7 Efectos de las luminarias en conjunto

En este apartado se estudiará el efecto de diversas luminarias unidas a la misma red de distribución, para comprobar lo que ocurre en este caso.

Debido al gran número de luminarias con características diferentes, se llevarán a cabo las pruebas con una que presente un valor medio que pueda ser representativa del resto. Para ello se realiza esta tabla, en la que se calcula el valor medio de la potencia y factor de potencia de todas las luminarias estudiadas en los apartados anteriores.

Luminaria	Potencia (W)	Factor de potencia
1 - Lexman LED	12	0,572
2 - Megaled	6	0,529
3 - LED	6	0,523
4 - Philips LED	11	0,56
5 - Roblan LED	10	0,545
6 - H2V LED	9	0,496
7 - Lexman CFL	23	0,582
8 - Lexman CFL	22	0,576
9 - Froiz CFL	11	0,61
10 - Froiz CFL	9	0,587
11 - Lexman CFL	15	0,591
MEDIA	12,18	0,56

Tabla 7.0.0.1 – Valores de cada luminaria y valor medio del total

Teniendo en cuenta que el valor medio de potencia de las luminarias estudiadas es de 12.18 Watios y el del factor de potencia de 0.56, se utilizará la luminaria Lexman de 12 W para representar los efectos de la conexión de muchas lámparas diferentes en paralelo.

Para realizar una modelización exacta de diversas luminarias habría que considerar que todas ellas tendrían diferente potencia, ya que dependería de las utilizadas en cada instalación. Sin embargo, se supone que esta de marca Lexman es significativa para poder representar el valor medio de las distintas potencias de las luminarias instaladas en viviendas.

Por tanto, se considera que se puede tomar como modelo base esta luminaria para el estudio realizado en este apartado del trabajo y obtener unos resultados fiables.

7.1. Comprobación del efecto de suma de corrientes armónicas

El hecho de conectar en paralelo distintas luminarias provoca un aumento de la corriente armónica que crea perturbaciones en la red. Esto es debido no sólo a la amplitud de estas corrientes armónicas, también influye el ángulo de fase de los diferentes armónicos.

Se comprueba que los ángulos de fase para un mismo armónico de distintas luminarias son muy similares entre sí, provocando una superposición vectorial que da lugar a una corriente mucho mayor a medida que aumenta el número de lámparas conectadas en esa red.

Para ello se representa la siguiente gráfica de la imagen, en la que se puede observar para el tercer y quinto armónico que los ángulos se encuentran dentro de un pequeño rango, lo que da lugar al efecto mencionado anteriormente.

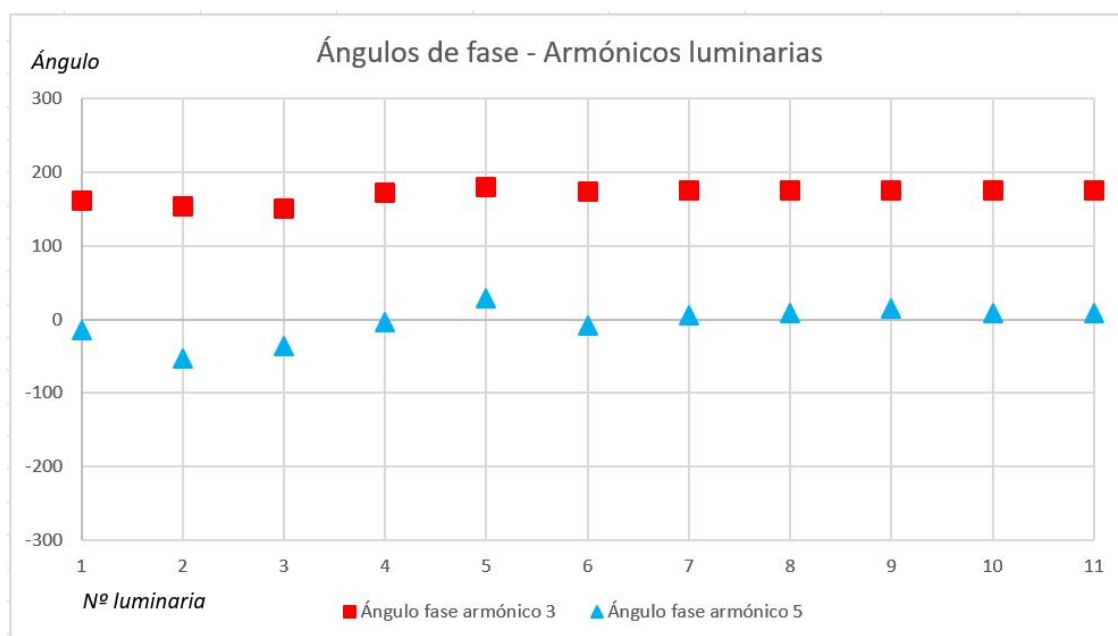


Figura 7.1.0.1 – Comparativa de ángulos de fase para tercer y quinto armónico

7.2. Estudio de la resonancia

La presencia de corrientes armónicas puede provocar un problema de resonancia en las redes de distribución, ya que en ocasiones la frecuencia de resonancia toma valores cercanos a los de la frecuencia de algún armónico importante.

Este evento amplifica los posibles armónicos afectados, haciendo que provoquen todavía más perturbaciones en los componentes de dicha red. Por ello, es importante realizar cálculos e identificar esta frecuencia para comprobar si esto ocurrirá en alguna instalación.

La normativa que se refiere a este tema es la norma UNE-EN 61642, que trata todos estos problemas y propone recomendaciones para aplicar en caso de existencia de resonancia serie o paralelo.

La frecuencia de resonancia se calcula con esta fórmula, según dicha UNE-EN 61642.

$$f_r = f_1 * \sqrt{\left| \frac{x_C}{x_L} \right|} \quad (7.2.0.1)$$

Donde:

- f_1 es la frecuencia fundamental.
- x_C es la reactancia capacitiva.
- x_L es la reactancia inductiva.

Se comprobará si podría existir resonancia en paralelo, para lo que se van a representar varios casos distintos con tres transformadores de distinta capacidad. El circuito equivalente del sistema sería el mostrado en la siguiente imagen:

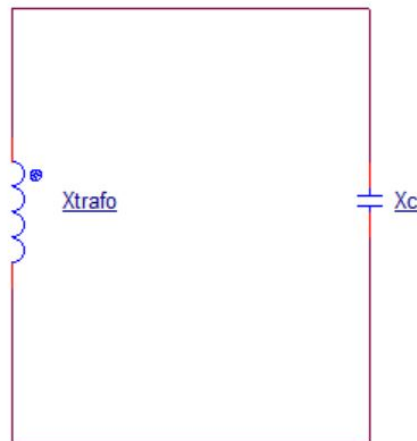


Figura 7.2.0.1 – Circuito equivalente de la red

En este circuito se representa la inductancia del trafo (ya que se considera que la de la red es despreciable por ser muy inferior a esta) y una inductancia capacitiva provocada por el consumo de reactiva de las luminarias.

Los datos de partida para esta comprobación de resonancia serán los siguientes:

- Se estudian tres bloques de edificios con 20 viviendas cada uno, alimentados todos ellos por un solo Centro de Transformación.
- Se representan diversos casos según el número de luminarias LED o CFL instaladas en los edificios, representándose para 1,2,5,10,12 y 16 luminarias de este tipo.
- Se realizarán los cálculos para cuatro transformadores de distinta capacidad, de forma que se pueda cuantificar la influencia de la potencia del transformador en los efectos de la resonancia.

- Se utilizará para los cálculos un valor medio de las luminarias, lo que dará una potencia reactiva (para el cálculo de la capacidad de las lámparas) de 8,4 VAr que corresponde al del modelo Lexman LED.

7.2.1. Caso 1 - Transformador de 250 kVA

Se parte de un transformador de potencia nominal 250 kVA, con tensión de cortocircuito $\varepsilon_{cc} = 6\%$ y una relación de transformación $r_t = 20/0.4$ kV.

Con estos datos se determina la reactancia del transformador, utilizando esta fórmula:

$$X_{trafo} = \frac{\varepsilon_{cc} * V^2}{100 * S_n} \quad (7.2.1.1)$$

Sustituyendo:

$$X_{trafo} = \frac{6 * 400^2}{100 * 250000} = 0,0384\Omega \quad (7.2.1.2)$$

De aquí se obtiene la inductancia del transformador:

$$L_{trafo} = X_{trafo} / \omega = 0,0384 / (2 * \pi * 50) = 0,12223mH \quad (7.2.1.3)$$

Se calcula también la capacidad de las luminarias, partiendo de la potencia reactiva de 8.4 VAr. Para una luminaria por vivienda se haría de la manera que se muestra.

Una luminaria presenta una potencia reactiva de 8,4VAr, por lo tanto considerando las 20 viviendas por bloque y 3 bloques de viviendas la reactiva total será la siguiente.

$$Q_c = 8,4VAr * 20viviendas/bloque * 3bloques = 504VAr \quad (7.2.1.4)$$

Teniendo la potencia reactiva se saca la reactancia capacitiva y por tanto la capacidad, según estas ecuaciones:

$$X_C = V^2 / Q_c = 230^2 / 504 = 104,96\Omega \quad (7.2.1.5)$$

$$C = 1 / \omega * X_c = 1 / (2 * \pi * 50 * 104,96) = 30,326\mu F \quad (7.2.1.6)$$

Para este caso de una luminaria, se calcularía la frecuencia de resonancia con la ecuación 7.2.0.1, obteniéndose este resultado de la ecuación 7.2.1.7.

$$f_r = 50 * \sqrt{\left| \frac{104,96}{0,0384} \right|} = 2614,068Hz. \quad (7.2.1.7)$$

Haciendo el resto de cálculos para este transformador, la capacidad de las luminarias y por tanto la frecuencia de resonancia para cada caso será la mostrada en la tabla.

Nº luminarias CFL	Capacidad (μF)	Frecuencia Resonancia (Hz)
1	30,326	2614,068
2	60,653	1848,425
5	151,633	1169,046
10	303,266	826,641
12	363,92	754,616
16	485,227	653,159

Tabla 7.2.1.1 – Resultados para transformador de 250 kVA

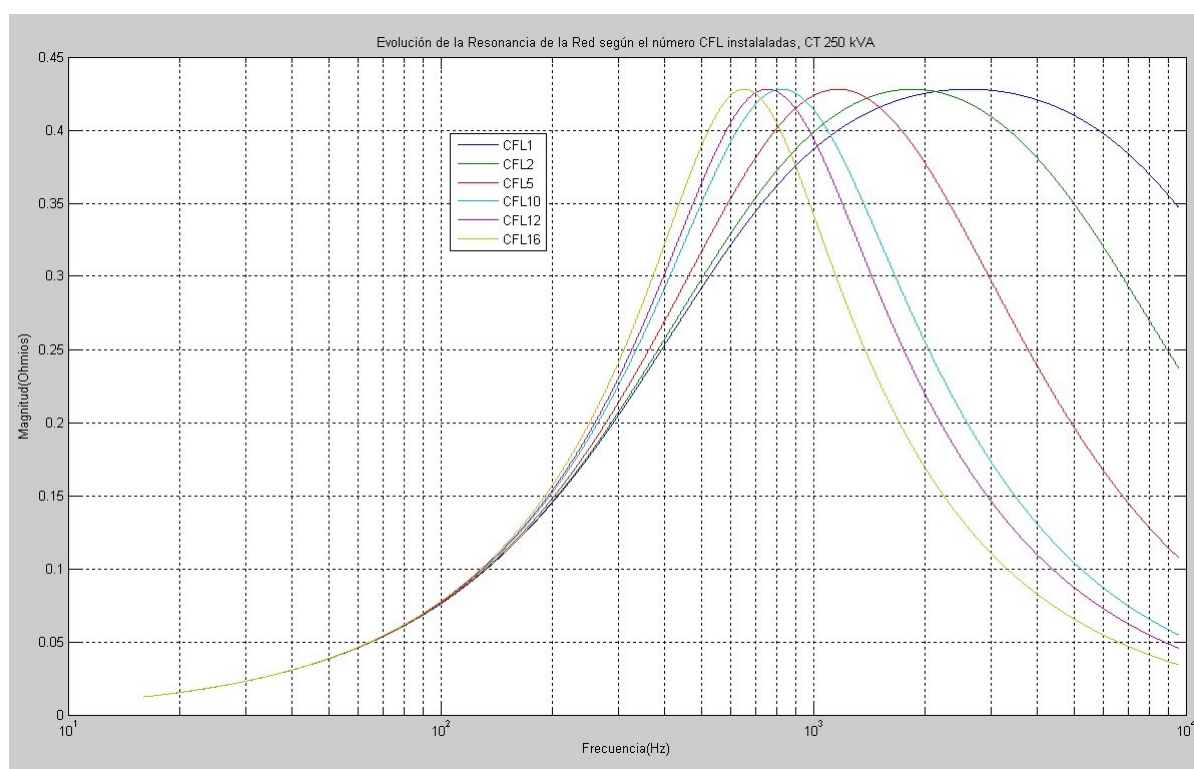


Figura 7.2.1.1 – Resonancia según nº de luminarias para transformador de 250 kVA

7.2.2. Caso 2 - Transformador de 400 kVA

Se considera un transformador de 400 kVA, con una tensión de cortocircuito $\varepsilon_{cc} = 6\%$ y una relación de transformación $r_t = 20/0.4$ kV.

Se determinan los valores del transformador y de las luminarias del mismo modo que en el caso anterior, obteniéndose lo siguiente:

$$X_{\text{trafo}} = 0.024 \, \Omega.$$

$$L_{\text{trafo}} = 7.63944 \cdot 10^{-5} \, \text{H}.$$

Del mismo modo, se presenta la tabla para todos los casos estudiados, con los valores de capacidad de las luminarias y sus frecuencias de resonancia, y la gráfica que representa los datos de la tabla 7.2.2.1.

Nº luminarias CFL	Capacidad (μF)	Frecuencia Resonancia (Hz)
1	30,326	3306,564
2	60,653	2338,093
5	151,633	1478,74
10	303,266	1045,627
12	363,92	954,522
16	485,227	826,641

Tabla 7.2.2.1 – Resultados para transformador de 400 kVA

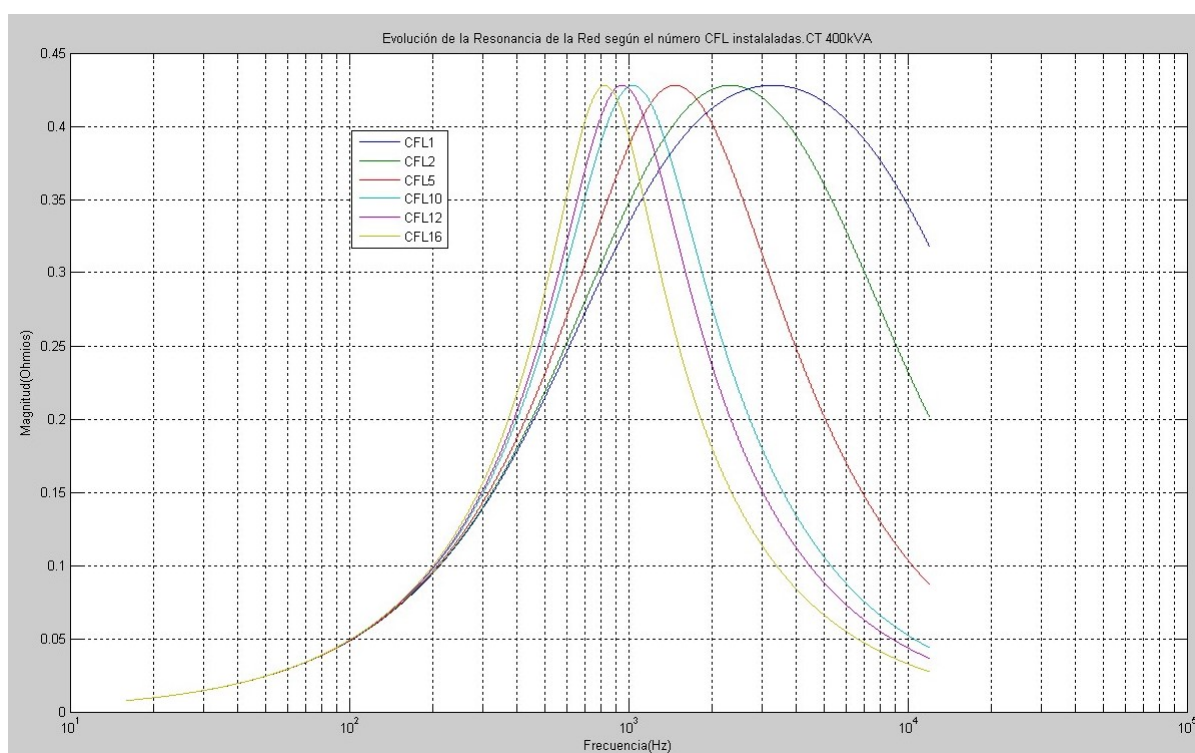


Figura 7.2.2.1 – Resonancia según nº de luminarias para transformador de 400 kVA

7.2.3. Caso 3 - Transformador de 630 kVA

Transformador de 630 kVA de potencia nominal, con una tensión de cortocircuito $\varepsilon_{cc} = 6\%$ y una relación de transformación $r_t = 20/0.4$ kV.

Para este caso se tienen estos valores del transformador:

$$X_{\text{trafo}} = 0.01524 \, \Omega.$$

$$L_{\text{trafo}} = 4.85044 \cdot 10^{-5} \, \text{H}.$$

Finalmente, se muestra al igual que en los otros casos la tabla con los valores obtenidos y su representación gráfica en la figura 7.2.3.1.

Nº luminarias CFL	Capacidad (μF)	Frecuencia Resonancia (Hz)
1	30,326	4149,705
2	60,653	2934,284
5	151,633	1855,804
10	303,266	1312,251
12	363,92	1197,916
16	485,227	1037,426

Tabla 7.2.3.1 – Resultados para transformador de 630 kVA

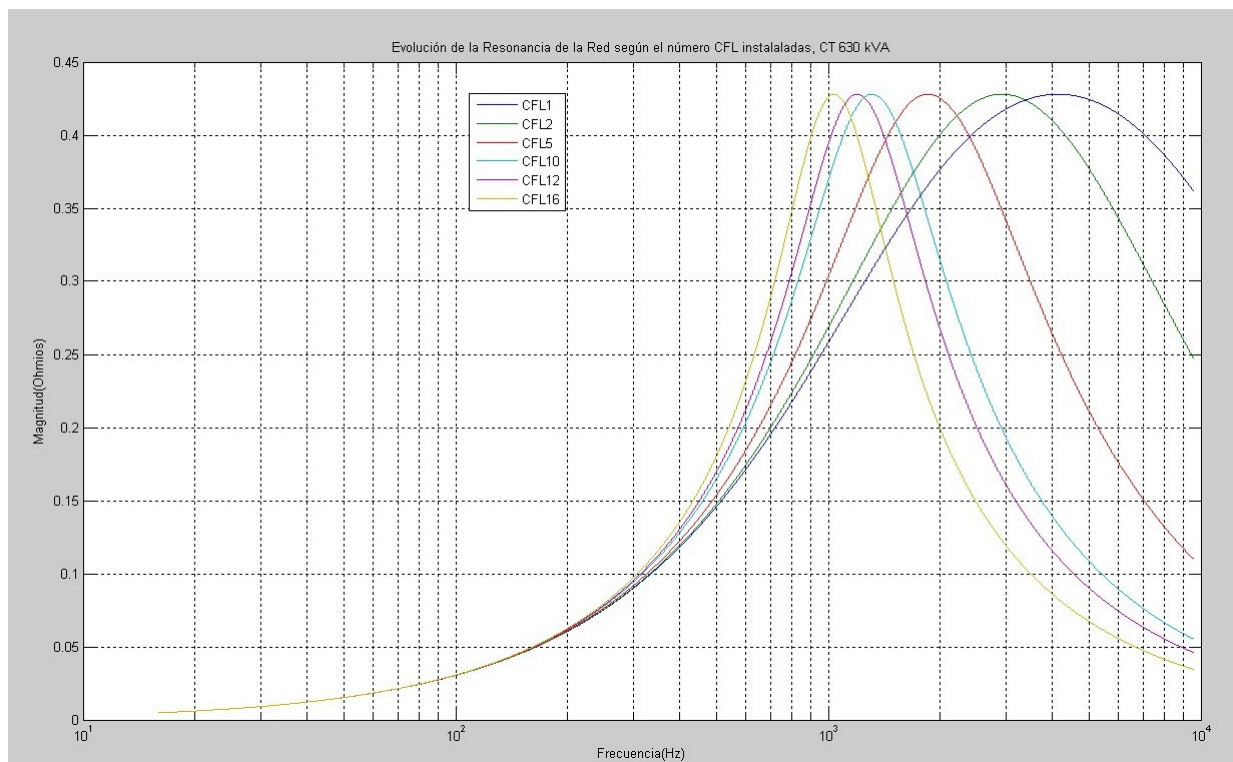


Figura 7.2.3.1 – Resonancia según nº de luminarias para transformador de 630 kVA

7.2.4. Caso 4 - Transformador de 800 kVA

Por último, se considera un transformador de potencia aparente 800 kVA, con una tensión de cortocircuito $\varepsilon_{cc} = 6\%$ y una relación de transformación $r_t = 20/0.4$ kV.

Se obtienen los siguientes valores:

$$X_{\text{trafo}} = 0.012 \, \Omega.$$

$$L_{\text{trafo}} = 3.81972 \cdot 10^{-5} \, \text{H}.$$

Se presentan los resultados obtenidos para los edificios de viviendas alimentados con este transformador.

Nº luminarias CFL	Capacidad (μ F)	Frecuencia Resonancia (Hz)
1	30,326	4676,187
2	60,653	3306,564
5	151,633	2091,254
10	303,266	1478,740
12	363,92	1349,899
16	485,227	1169,046

Tabla 7.2.4.1 – Resultados para transformador de 800 kVA

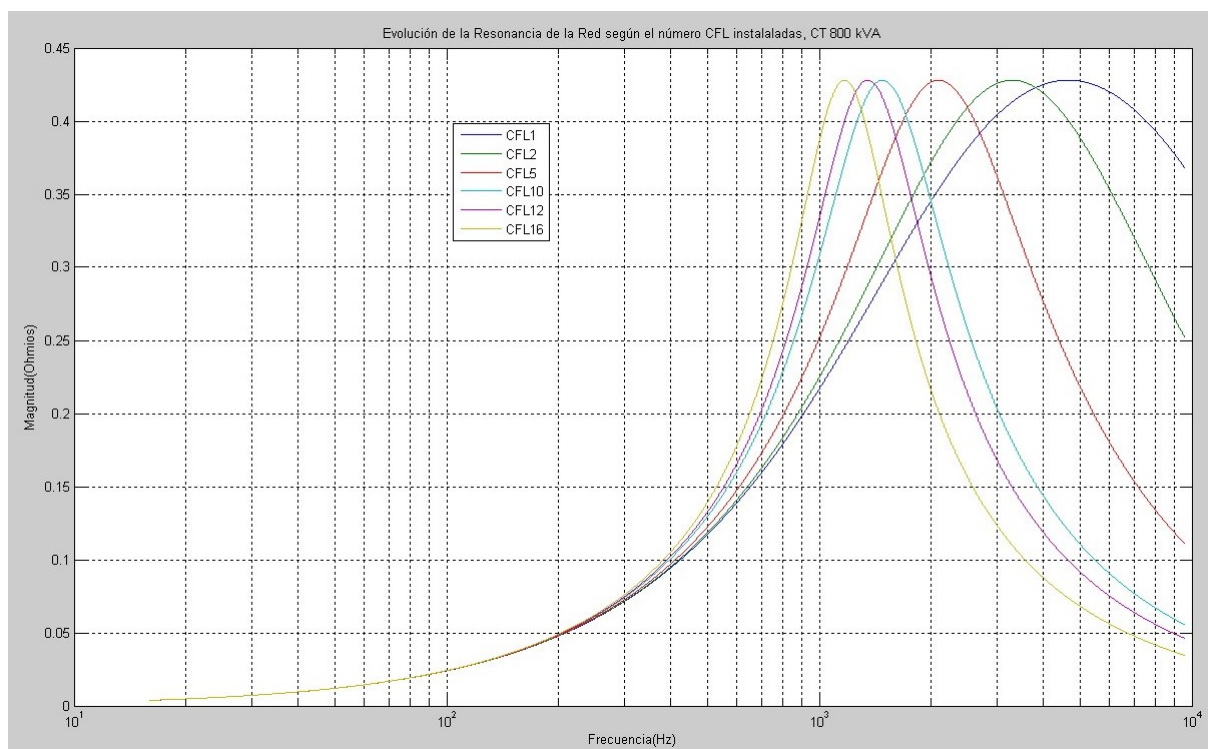


Figura 7.2.4.1 – Resonancia según nº de luminarias para transformador de 800 kVA

7.2.5. Conclusiones

Para interpretar los resultados obtenidos con este estudio, se presentan en la siguiente tabla comparativa los valores de cada transformador:

Potencia transformador (kVA)	Ltrafo (H)	Frecuencia resonancia mínima (Hz)	Armónico más cercano
250	12.223 e-5	653.159	orden 13 (f= 650 Hz)
400	7.63944 e-5	826.642	orden 15 (f = 750 Hz)
630	4.85044 e-5	1037.426	orden 21 (f = 1050 Hz)
800	3.81972 e-5	1169.046	orden 23 (f = 1150 Hz)

Tabla 7.2.5.1 – Tabla comparativa de todos los transformadores

Se puede observar que, para una mayor potencia del transformador el valor de X_{trafo} y L_{trafo} disminuye, y se desplaza la frecuencia mínima de resonancia, siendo en este caso más elevada. Se elige la mínima porque será la más aproximada a los armónicos de orden cercano

al de frecuencia fundamental, que son los que más afectan a la red.

También se puede ver en las tablas con distinto número de luminarias, que la conexión de un mayor número de ellas disminuye la frecuencia de resonancia considerablemente.

Esto genera un problema en caso de que, como está ocurriendo actualmente, se produzca un cambio paulatino de sistemas de iluminación convencional por lámparas LED y de bajo consumo.

Con pocas luminarias de este tipo instaladas en hogares, industrias o alumbrado público no existe problema de resonancia en armónicos de frecuencia cercana a la fundamental, por lo que posiblemente no se creen perturbaciones importantes debidos a este fenómeno en la red y sus componentes. Sin embargo, en caso de seguir aumentando el uso de estos sistemas de iluminación sería necesario el uso de filtros para evitar la amplificación de armónicos de tercer, quinto o séptimo orden, por ejemplo.

8 Soluciones para la reducción de distorsión armónica

Para evitar estas perturbaciones en la red y adecuar los valores a los permitidos por la normativa (Norma UNE-EN 61642), la solución es la instalación de filtros de armónicos.

Hay diversos tipos de filtros, uno de estos tipos es el de los filtros pasivos, que pueden ser de dos formas según su actuación frente a los armónicos.

8.1. Filtros pasivos

8.1.1. Filtros de rechazo

Los filtros de rechazo impiden la resonancia en paralelo entre el transformador y equipos de compensación o cargas capacitivas, de este modo evitan la sobrecarga de corriente armónica.

Para ello, oponen una impedancia muy elevada a los armónicos que se desea eliminar, así disminuyen su valor y desplazan la frecuencia de resonancia en paralelo a un valor lejano a la frecuencia de los armónicos evitando su amplificación. Ese funcionamiento se muestra en la figura 8.1.1.1, en donde se ve marcada en rojo la nueva frecuencia de resonancia, lejos de la anterior y del residuo armónico.

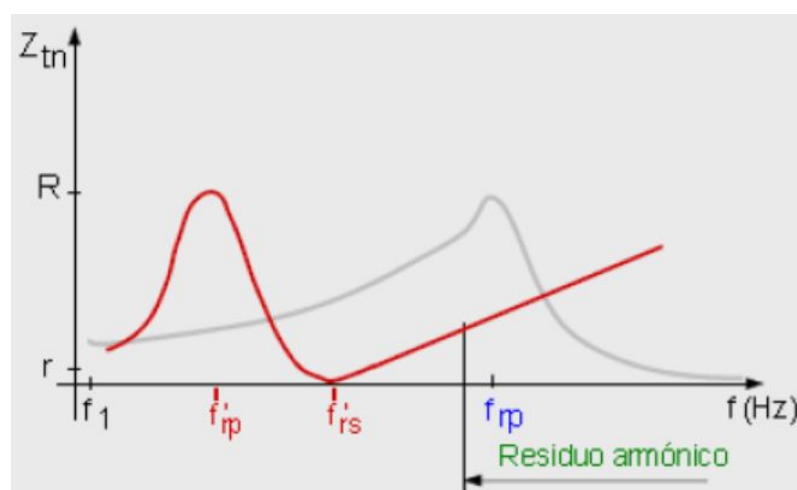


Figura 8.1.1.1 – Efecto de filtro de rechazo sobre frecuencia de resonancia en paralelo

La conexión se realiza en serie con el circuito a proteger, como se muestra en la siguiente imagen en donde el filtro de rechazo protege de los armónicos a un equipo de compensación de potencia.

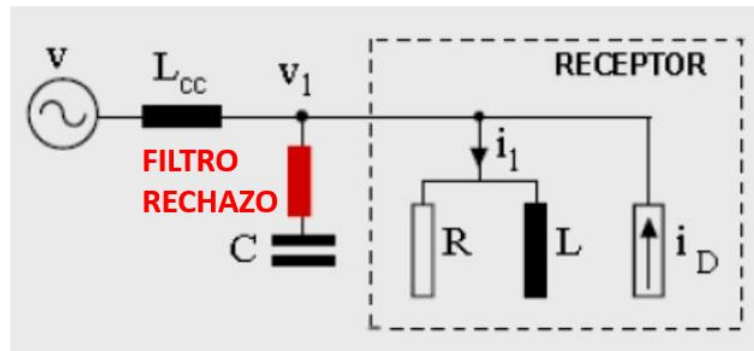


Figura 8.1.1.2 – Ejemplo de conexión de un filtro de rechazo

Esta solución se hace a medida para cada caso, dependiendo de cada circuito en particular y del análisis realizado previamente.

8.1.2. Filtros de absorción

Los filtros de absorción están formados por ramas L-C, cada una de ellas asociada a un armónico y con los valores de la bobina y el condensador dimensionados según la corriente armónica a absorber.

La conexión sería de la siguiente forma, en paralelo con la carga generadora de armónicos:

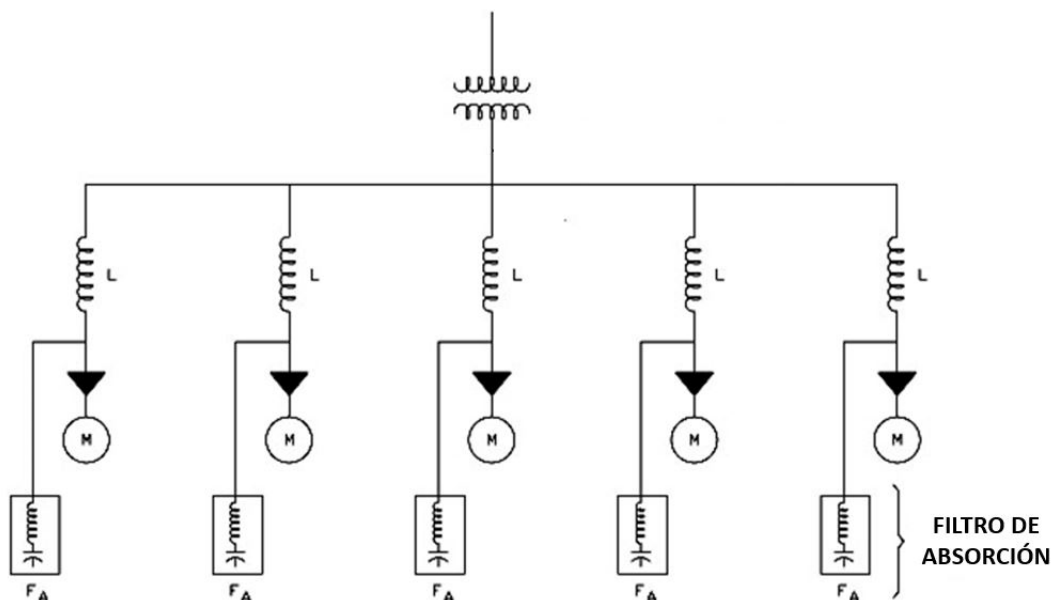


Figura 8.1.2.1 – Ejemplo de conexión de un filtro de absorción

8.2. Filtros activos

Los filtros activos inyectan corrientes armónicas opuestas en fase a las que circulan por la red, de forma que cancelan los armónicos. Se adaptan en tiempo real a los armónicos que haya en ese momento en la instalación, por lo que son más flexibles que los filtros pasivos.

Su conexión se realiza en serie o en paralelo con el sistema según las necesidades, y en la imagen 8.2.0.1 se muestra un ejemplo de su funcionamiento, donde se ve la corriente I_H que inyecta el filtro y que luego se suma a la del circuito.

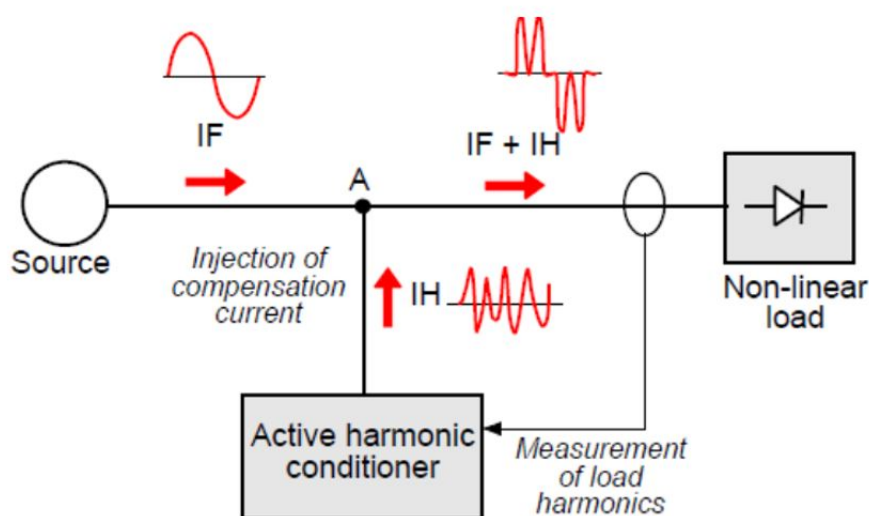


Figura 8.2.0.1 – Ejemplo de funcionamiento de un filtro activo

8.3. Comparativa

Para determinar las características de cada tipo de filtro y las posibles opciones para la instalación, se realiza una tabla comparativa con las ventajas e inconvenientes de todos ellos:

Tipo de filtro	Ventajas	Inconvenientes
Filtro de rechazo	Protege una instalación en caso de haber muchas cargas diferentes conectadas	Precisa un análisis exhaustivo y un diseño particular para cada caso
Filtro de absorción	Intercepta los armónicos, que no llegan a la instalación	Es necesario un tipo de filtro diferente para cada armónico
Filtro activo	Más flexibilidad que filtros pasivos, elimina armónicos hasta el 50 y es válido para cualquier instalación	Su precio es más elevado que el de los filtros pasivos, y presenta mayor complejidad

Tabla 8.3.0.1 – Comparativa entre los distintos tipos de filtros

Considerando las características de los bloques de viviendas estudiados, habría estas tres opciones a la hora de reducir las corrientes armónicas:

- Una posibilidad sería instalar un filtro pasivo de absorción, pero esto se tendría que llevar a cabo para cada marca y modelo de luminaria. Cada fabricante tendría que encargarse de introducir el filtro en sus propios productos, posiblemente elevando su precio y sin posibilidad de actuar sobre todas las que ya están instaladas.

Para conseguir que todos los fabricantes llegaran a instalar un filtro, seguramente sería necesaria una normativa que obligue a reducir los armónicos en las luminarias desde su proceso de fabricación, para no tener que actuar luego sobre la red.

- Otra posibilidad es la de instalar un filtro de rechazo para cada bloque de viviendas, de forma que reduzca o elimine los armónicos más dañinos para la red.
- Además, podría instalarse en la red un filtro activo que, dado que puede adaptarse a los armónicos existentes en tiempo real, sería útil para el caso de conexión de más lámparas a dicha red, no teniendo problemas de funcionamiento pese a que varíen las condiciones de los armónicos.

Los filtros activos son componentes electrónicos cuyo cálculo no compete a este trabajo, y los filtros de absorción tendrían que ser determinados por cada fabricante para sus modelos de luminarias.

Por tanto, en este caso, se demostrará el cálculo para un filtro de rechazo que se instala en cada bloque de viviendas y bloquea el paso de las corrientes armónicas de orden 3 (circulan por el neutro) y las de orden 5 y 7, ya que son las que más efectos provocan.

8.4. Diseño de un filtro de rechazo para un bloque de viviendas

Se realizará el posible diseño de un filtro de rechazo para un bloque de viviendas, utilizando como ejemplo los valores de la luminaria LED de marca Lexman (de 12 W), ya que coincide aproximadamente con el valor medio de todos los modelos estudiados.

Estos filtros se colocarán en todas las fases y en el neutro, impidiendo de este modo las sobrecargas y deterioros en los centros de transformación que alimentan a las viviendas.

Se consideran por tanto:

- Una luminaria LED de 12W marca Lexman como ejemplo para obtener los datos de las corrientes.
- 16 luminarias por vivienda, ya que es el caso más desfavorable.
- 20 viviendas en cada bloque, como en el apartado anterior.

Con estos datos se calculan las corrientes para cada armónico a estudiar:

$$I_3 = 0,045056A/luminaria * 16luminarias/vivienda * 20viviendas = 14,417A. \quad (8.4.0.1)$$

$$I_5 = 0,02848A/luminaria * 16luminarias/vivienda * 20viviendas = 9,1136A. \quad (8.4.0.2)$$

$$I_7 = 0,022848A/luminaria * 16luminarias/vivienda * 20viviendas = 7,308A. \quad (8.4.0.3)$$

Una vez obtenidos estos datos, el esquema sería el de la siguiente figura, con los filtros de rechazo en cada fase para el quinto y séptimo armónico, y en el neutro el filtro del tercer armónico.

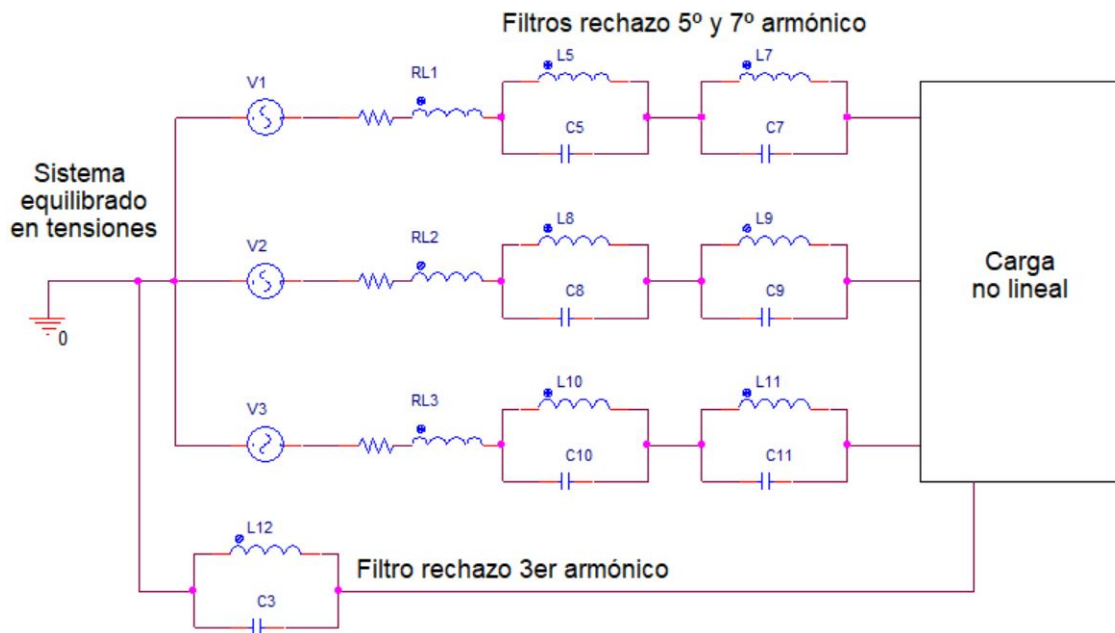


Figura 8.4.0.1 – Esquema del filtro de rechazo a calcular

Los filtros de rechazo presentan un parámetro denominado factor de calidad, que depende de la resistencia de la inductancia o bobina (r), la pulsación a la frecuencia fundamental ω_1 y el valor de la inductancia L_n para cada armónico. Esto permitirá calcular dicho valor de la inductancia.

Los valores son los siguientes para este caso:

- $\omega_1 = 2 * \pi * 50 = 314.16 \text{ rad/s.}$
- r es el valor de la resistencia de la bobina, se toma como valor $2.2 \text{ m}\Omega$.

- q es el factor de calidad, que se toma como 150 para bobinas industriales.

Como el coste de fabricación de inductancias es superior al de los condensadores, se utiliza el mismo valor $L_3=L_5=L_7$ y que se calcula para la fórmula anterior:

$$L_n = (150 * 2,2) / 314,16 = 1,05042mH \quad (8.4.0.4)$$

Una vez determinado el valor de las inductancias, se calcula el valor de los condensadores C_3 , C_5 , y C_7 para cada uno de los filtros.

Para calcular este valor de capacidad, se usa la condición de resonancia a cada frecuencia, que se define por esta fórmula.

$$C_n = 1 / (n * w)^2 * L_n \quad (8.4.0.5)$$

En donde n es el orden de cada armónico.

Posteriormente, se calcula la C para cada frecuencia.

$$C_3 = 1 / (3 * 314,16)^2 * 1,05042 * 10^{-3} = 1,07174mF. \quad (8.4.0.6)$$

$$C_5 = 1 / (5 * 314,16)^2 * 1,05042 * 10^{-3} = 0,38582mF. \quad (8.4.0.7)$$

$$C_7 = 1 / (7 * 314,16)^2 * 1,05042 * 10^{-3} = 0,19685mF. \quad (8.4.0.8)$$

Con estos cálculos se tendría completo el filtro de la figura **8.4.0.1**, que funcionaría para uno de los bloques de viviendas anteriormente estudiados, reduciendo los armónicos de orden 3,5 y 7 que son los que más afectan a la red de distribución.

9 Conclusiones

En este trabajo se han estudiado las características de diversas luminarias de tipo LED y CFL y sus efectos sobre las redes de distribución, comprobándose que generan perturbaciones con independencia de su modelo, potencia o fabricante.

Se resumen los valores más importantes obtenidos en esta tabla, de la que se pueden sacar diversas conclusiones:

Luminaria	P.activa fabricante (W)	P.activa real (W)	Potencia reactiva (VAr)	Potencia distorsión (VAr)	Potencia aparente (VA)	FDP	THD I (%)
<i>Lexman LED</i>	12	12,22	-8,399	15,37	21,36	0,572	72,1
<i>MegaLed LED x1</i>	6	5,806	-3,753	8,526	10,98	0,529	78
<i>MegaLed LED x2</i>	12	11,73	-7,379	17,13	22,04	0,532	78
<i>Led</i>	6	6,169	-4,270	9,096	11,79	0,523	77,4
<i>Philips LED</i>	11	10,54	-3,967	15,09	18,83	0,56	80,5
<i>Roblan LED</i>	10	9,70	-11,60	9,397	17,81	0,545	52,2
<i>H2V LED</i>	9	9,632	-3,474	16,51	19,43	0,496	85,2
<i>Lexman CFL x1</i>	23	21,36	-10,06	28,14	36,73	0,582	76,9
<i>Lexman CFL x2</i>	46	43,15	-20,65	55,52	73,29	0,589	76,2
<i>Lexman CFL x1</i>	22	20,99	-9,986	28,03	36,42	0,576	77,4
<i>Lexman CFL x2</i>	44	42,49	-20,02	56,22	73,25	0,58	77
<i>Froiz CFL</i>	11	11,16	-6,288	13,07	18,31	0,61	71,7
<i>Froiz CFL</i>	9	8,493	-4,613	10,78	14,48	0,587	74,8
<i>Lexman CFL</i>	15	14,24	-7,365	18,05	24,11	0,591	75

Tabla 9.0.0.1 – Tabla resumen comparativa de luminarias

Como se puede ver, todas ellas presentan una tasa elevada de distorsión total en corriente, así como un factor de potencia bastante reducido que indica que el funcionamiento de estas luminarias no es correcto.

La potencia activa varía algo respecto a la que expresa el fabricante, y además hay una generación de potencia reactiva debida al comportamiento capacitivo de las lámparas. Del mismo modo existe una potencia de distorsión debida a los armónicos, que hace elevar la potencia aparente total hasta el punto de que casi duplica a la potencia activa de las luminarias.

Por todo esto, el hecho de utilizar estos tipos de luminarias en viviendas, industrias y otras instalaciones afecta a las máquinas y conductores de la red eléctrica, reduciendo la vida útil de equipos y produciendo pérdidas. Esto hace que la Calidad del Servicio Eléctrico se vea afectada, e incumpla los niveles establecidos.

Como se ha mencionado anteriormente, esto se irá viendo afectado con la sustitución de los sistemas de iluminación tradicionales ya que, estudiando la modelización y los efectos de las luminarias en conjunto, se determina que las perturbaciones aumentan progresivamente al crecer el número de lámparas instaladas, disminuyendo la frecuencia de resonancia paralelo y produciendo sobrecargas debidas a la corriente armónica. Considerando una vivienda de tamaño medio con 3 o 4 habitaciones y con portalámparas que lleven varias bombillas, no resulta difícil superar el límite de 16 bombillas por vivienda en las que se ha basado el estudio si todas ellas se van cambiando por LED o CFL, por lo que los efectos serían aún peores que los calculados.

Debido a que las compañías distribuidoras se verán cada vez más afectadas, podrían llegar a tomar medidas que repercutirían en los consumidores. En la actualidad estos no se ven perjudicados, ya que los contadores existentes hasta ahora no miden todos los parámetros y en cuanto al consumo y ahorro energético el funcionamiento es correcto para ellos, además de no influir a nivel económico.

Sin embargo, el proceso actual de sustitución de estos equipos de medición por los nuevos contadores digitales, que ha de finalizar en el año 2018, permitirá que las compañías eléctricas dispongan de todos los parámetros de consumo de sus clientes. De esta manera, sería posible llegar a establecer una penalización por inyección de armónicos a la red, para compensar la reducción de vida útil de los transformadores y conductores y su mal funcionamiento, así como el incumplimiento de los preceptos de Calidad del Servicio Eléctrico.

Todos estos problemas para las compañías distribuidoras (de afectación de los componentes de la red) y para los consumidores (posibles penalizaciones y aumento de la factura eléctrica) así como el hecho de que las lámparas LED y CFL son muy interesantes en lo que se refiere a eficiencia y ahorro energético frente a otros sistemas de alumbrado, son condición suficiente para estudiar y reducir mediante filtros como los aquí descritos esas perturbaciones analizadas en este trabajo.

TÍTULO: **REPERCUSIÓN DEL USO DE LA TECNOLOGÍA CFL Y LED
DE ILUMINACIÓN EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN**

ANEXOS

PETICIONARIO: **ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: **JUNIO DE 2017**

AUTOR: **EL ALUMNO**

Fdo.: **ALBA CARBALLEIRA DEL POZO**

Índice del documento ANEXOS

10 Realización de medidas en laboratorio	59
10.1 Luminaria 1 - Lexman LED	60
10.2 Luminaria 2 - Megaled LED	62
10.3 Luminaria 3 - LED	67
10.4 Luminaria 4 - Philips LED	69
10.5 Luminaria 5 - Roblan LED	72
10.6 Luminaria 6 - H2V LED	74
10.7 Luminaria 7 - Lexman CFL	76
10.8 Luminaria 8 - Lexman CFL	81
10.9 Luminaria 9 - Froiz CFL	85
10.10 Luminaria 10 - Froiz CFL	87
10.11 Luminaria 11 - Lexman CFL	90
 11 Modelización individual de las luminarias	 93
11.1 Luminaria 1 - Lexman LED	94
11.2 Luminaria 2 - Megaled LED	95
11.3 Luminaria 3 - LED	97
11.4 Luminaria 4 - Philips LED	98
11.5 Luminaria 5 - Roblan LED	99
11.6 Luminaria 6 - H2V LED	100
11.7 Luminaria 7 - Lexman CFL	101
11.8 Luminaria 8 - Lexman CFL	103
11.9 Luminaria 9 - Froiz CFL	105
11.10 Luminaria 10 - Froiz CFL	106

10 Realización de medidas en laboratorio

En el presente Anexo se presentarán y estudiarán los resultados de las medidas de las distintas luminarias con el Analizador de Redes C.A. 8331.

Los datos de partida son las características presentadas por el fabricante que aparecen en las cajas de las distintas bombillas, y se resumen en la siguiente tabla:

Luminaria	Tipo	Marca	Potencia (W)	Lúmenes	Duración	Calificación energética
1	LED	Lexman	12	1055	>15000 on/off	A+
2	LED	MegaLed	6	600	15 años	A+
3	LED	Led	6	400	>10000 on/off	A+
4	LED	Philips	11	1055	15000 h	A+
5	LED	Roblan	10	806	25000 h	A+
6	LED	H2V	9	806	<15000 on/off	A+
7	CFL	Lexman	23	1398	10000 h	A
8	CFL	Lexman	22	1297	6000 h	A
9	CFL	Froiz	11	600	8000 h	A
10	CFL	Froiz	9	450	8000 h	A
11	CFL	Lexman	15	800	6000 h	A

Tabla 10.0.0.1 – Características de las luminarias estudiadas en laboratorio

En los apartados posteriores se muestran los resultados obtenidos para cada una de las luminarias estudiadas, mostrándose en el apartado de conclusiones de la memoria de este trabajo una comparativa entre todas ellas.

10.1. Luminaria 1 - Lexman LED

Luminaria tipo LED de marca Lexman, que presenta las siguientes características:

Luminaria	1
Tipo	LED
Marca	Lexman
Potencia (W)	12
Lúmenes	1055
Duración	>15000 on/off
Calificación energética	A+



Tabla 10.1.0.1 – Características de la luminaria 1

Figura 10.1.0.1 – Luminaria 1

En la figura 10.1.0.2 se presenta la forma de onda de la luminaria, así como los parámetros más importantes obtenidos con el analizador en la tabla 10.1.0.2.

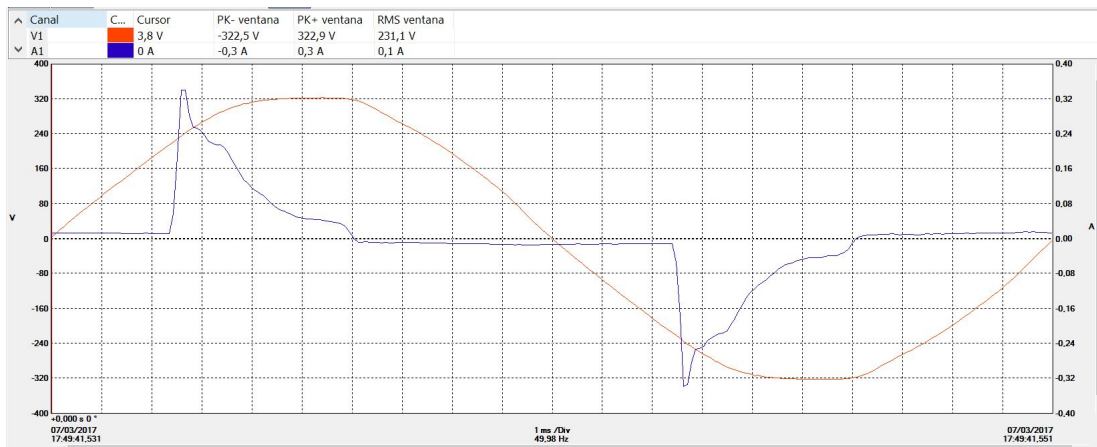


Figura 10.1.0.2 – Forma de onda de la luminaria 1

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	231
A rms	A	0,092
F	Hz	49,98
V THDr	% r	1,5
A THDr	% r	72,1
φ	°	-35
P (W)	W	12,22
Q (var)	var	-8,399
D (var)	var	15,37
S (VA)	VA	21,36
PF		0,572
Cos φ (DPF)		0,822

Tabla 10.1.0.2 – Parámetros de la luminaria 1

Finalmente, se muestran los armónicos tanto representados en una tabla como el espectro de los armónicos impares de corriente, que son los más elevados.

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	% f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	231,1	0	1	100	0,064	0	26	0,1	0,000064	150
2	0	0	---	2	0,1	0,000064	-109	27	10	0,0064	23
3	0,3	0,6933	171	3	70,4	0,045056	161	28	0	0	---
4	0	0	---	4	0,1	0,000064	-45	29	8,1	0,005184	-139
5	0,6	1,3866	131	5	44,5	0,02848	-14	30	0,1	0,000064	-159
6	0	0	---	6	0,2	0,000128	68	31	7,8	0,004992	62
7	1,2	2,7732	48	7	35,7	0,022848	-176	32	0	0	---
8	0	0	---	8	0,3	0,000192	-134	33	6,5	0,00416	-102
9	0,4	0,9244	-167	9	28,3	0,018112	8	34	0	0	---
10	0	0	---	10	0,4	0,000256	36	35	5,3	0,003392	111
11	0,2	0,4622	29	11	16,5	0,01056	-154	36	0,1	0,000064	135
12	0	0	---	12	0,5	0,00032	-154	37	6,1	0,003904	-44
13	0,2	0,4622	128	13	15	0,0096	67	38	0,1	0,000064	-33
14	0	0	---	14	0,4	0,000256	5	39	6,1	0,003904	148
15	0,1	0,2311	-130	15	14,5	0,00928	-101	40	0,1	0,000064	143
16	0	0	---	16	0,1	0,000064	180	41	5,4	0,003456	-10
17	0	0	---	17	10,7	0,006848	104	42	0	0	---
18	0	0	---	18	0	0	---	43	5,5	0,00352	-170
19	0	0	---	19	11,8	0,007552	-45	44	0	0	---
20	0	0	---	20	0	0	---	45	5	0,0032	25
21	0	0	---	21	11,5	0,00736	147	46	0,1	0,000064	49
22	0	0	---	22	0,1	0,000064	178	47	4,6	0,002944	-131
23	0	0	---	23	9,7	0,006208	-11	48	0,1	0,000064	-132
24	0	0	---	24	0,1	0,000064	-32	49	4,8	0,003072	67
25	0	0	---	25	10,5	0,00672	-168	50	0,1	0,000064	61

Tabla 10.1.0.3 – Armónicos de tensión y corriente de la luminaria 1

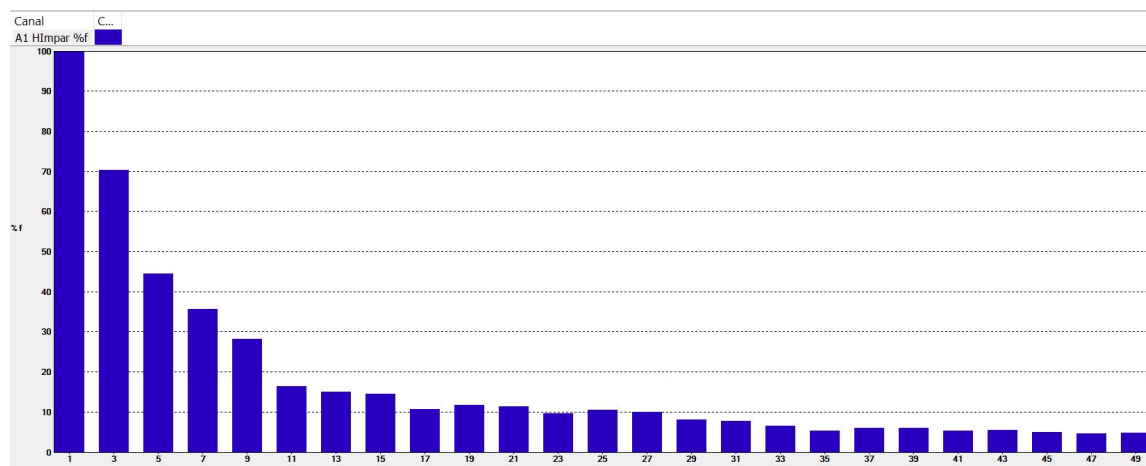


Figura 10.1.0.3 – Espectro armónico de la luminaria 1 (Armónicos impares de corriente)

Se puede comprobar que se cumple lo presentado en esta fórmula respecto a la potencia de distorsión, que corresponde al producto de la tensión por la raíz cuadrada del sumatorio de todas las componentes de intensidad de los armónicos elevadas al cuadrado.

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.1.0.1)$$

Se realizan los cálculos para los primeros 25 armónicos y utilizando sólo los de orden impar, ya que los de orden par son muy pequeños y apenas influyen en el resultado. Se muestra parte de la operación llevada a cabo, ya que la suma de los 25 armónicos ocuparía un espacio muy elevado en la ecuación.

$$D = 231,1 * \sqrt{(0,045056^2) + (0,02848^2) + (0,022848^2) + \dots} = 15,0176 \quad (10.1.0.2)$$

El valor obtenido es muy similar al presentado en la tabla 10.1.0.2, que es el calculado por el analizador de redes y es de 15,37 VAR.

10.2. Luminaria 2 - Megaled LED

Luminaria tipo LED de marca Megaled, que presenta las siguientes características:

Luminaria	2
Tipo	LED
Marca	MegaLed
Potencia (W)	6
Lúmenes	600
Duración	15 años
Calificación energética	A+

Tabla 10.2.0.1 – Características de la luminaria 2



Figura 10.2.0.1 – Luminaria 2

En este caso se dispone de dos luminarias idénticas, por lo que además de realizar la medida individual, se hará una con ambas para comprobar si los armónicos y otros parámetros varían al conectarlas en paralelo o siguen siendo similares.

Características de una sola luminaria

Se presentan la forma de onda y parámetros básicos para el caso de una sola luminaria de este tipo en la figura 10.2.0.2 y tabla 10.2.0.2:

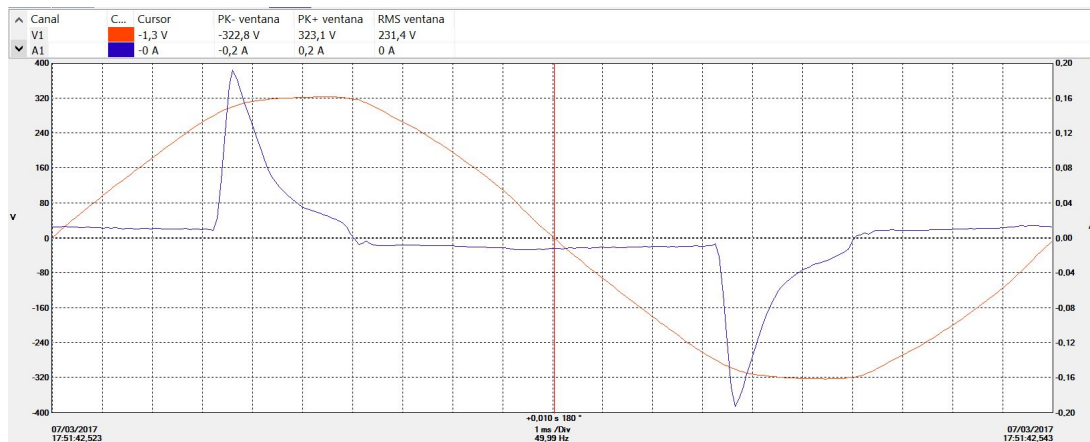


Figura 10.2.0.2 – Forma de onda de la luminaria 2 (una luminaria)

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	231,4
A rms	A	0,047
F	Hz	49,99
V THDr	% r	1,4
A THDr	% r	78
φ	°	-33
P (W)	W	5,806
Q (var)	var	-3,753
D (var)	var	8,526
S (VA)	VA	10,98
PF		0,529
Cos φ (DPF)		0,837

Tabla 10.2.0.2 – Parámetros de la luminaria 2 (una luminaria)

Del mismo modo se presentan los armónicos y su espectro en la tabla 10.2.0.3 y la figura 10.2.0.3:

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	% f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	231,3	0	1	100	0,03	0	26	0,1	0,00003	170
2	0	0	---	2	0,1	0,00003	-165	27	9,4	0,00282	-8
3	0,2	0,4626	176	3	75,9	0,02277	131	28	0,1	0,00003	37
4	0	0	---	4	0,1	0,00003	-40	29	8,7	0,00261	157
5	0,5	1,1565	135	5	56,2	0,01686	-74	30	0,1	0,00003	-159
6	0	0	---	6	0,1	0,00003	101	31	6,8	0,00204	-30
7	1,2	2,7756	45	7	39,5	0,01185	92	32	0,1	0,00003	-27
8	0	0	---	8	0,3	0,00009	-115	33	6,1	0,00183	146
9	0,4	0,9252	-170	9	36,8	0,01104	-96	34	0,1	0,00003	111
10	0	0	---	10	0,2	0,00006	41	35	6	0,0018	-44
11	0,1	0,2313	47	11	34,4	0,01032	67	36	0	0	---
12	0	0	---	12	0,2	0,00006	174	37	5,4	0,00162	124
13	0,2	0,4626	138	13	28,1	0,00843	-134	38	0,1	0,00003	130
14	0	0	---	14	0,3	0,00009	-18	39	4,2	0,00126	-69
15	0,1	0,2313	-137	15	20,7	0,00621	35	40	0,2	0,00006	-51
16	0	0	---	16	0,3	0,00009	119	41	3,6	0,00108	109
17	0	0	---	17	17,2	0,00516	-149	42	0,2	0,00006	107
18	0	0	---	18	0,2	0,00006	-110	43	3,5	0,00105	-75
19	0,1	0,2313	-159	19	16,3	0,00489	22	44	0	0	---
20	0	0	---	20	0,2	0,00006	62	45	3,1	0,00093	90
21	0	0	---	21	13,8	0,00414	-171	46	0,1	0,00003	150
22	0	0	---	22	0,3	0,00009	-120	47	2,4	0,00072	-103
23	0	0	---	23	11,3	0,00339	-1	48	0	0	---
24	0	0	---	24	0,3	0,00009	24	49	1,7	0,00051	77
25	0	0	---	25	9,6	0,00288	179	50	0	0	---

Tabla 10.2.0.3 – Armónicos de la luminaria 2 (una luminaria)

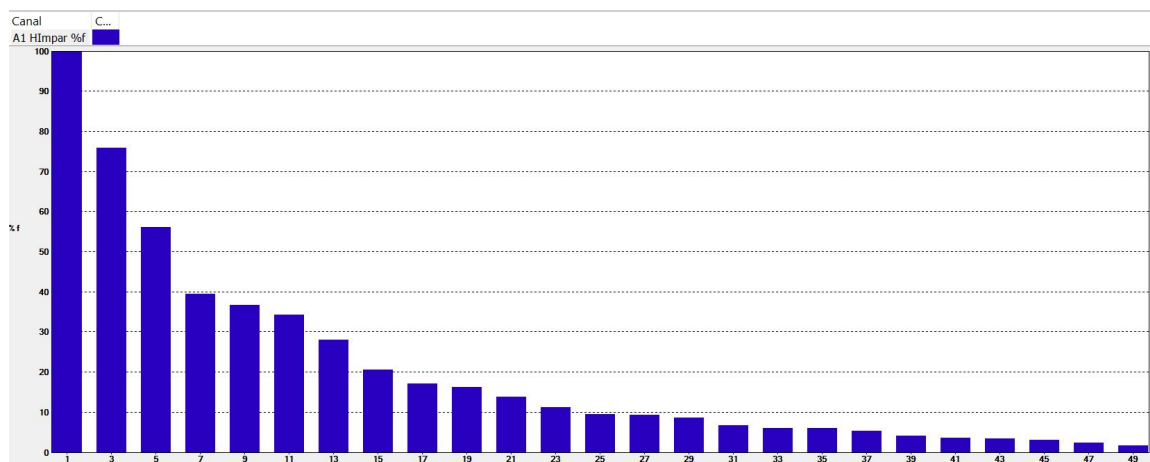


Figura 10.2.0.3 – Espectro armónico de la luminaria 2 (Armónicos impares de corriente, una luminaria)

Se comprueba el cumplimiento de lo siguiente respecto a la potencia de distorsión:

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.2.0.1)$$

Se realizan los cálculos para los primeros 25 armónicos y utilizando sólo los de orden impar, ya que los de orden par son muy pequeños y apenas influyen en el resultado. Se muestra parte de la operación llevada a cabo, ya que la suma de los 25 armónicos ocuparía un espacio muy elevado en la ecuación.

$$D = 231,4 * \sqrt{(0,002277^2) + (0,01686^2) + (0,01185^2) + \dots} = 8,388VAr \quad (10.2.0.2)$$

El valor obtenido es muy similar al presentado en la tabla 10.2.0.2, que es el calculado por el analizador de redes y es de 8.526 VAR.

Características de dos luminarias

Se presentan la forma de onda y parámetros básicos, ahora para dos de estas luminarias conectadas en paralelo, en la figura 10.2.0.4 y tabla 10.2.0.4:

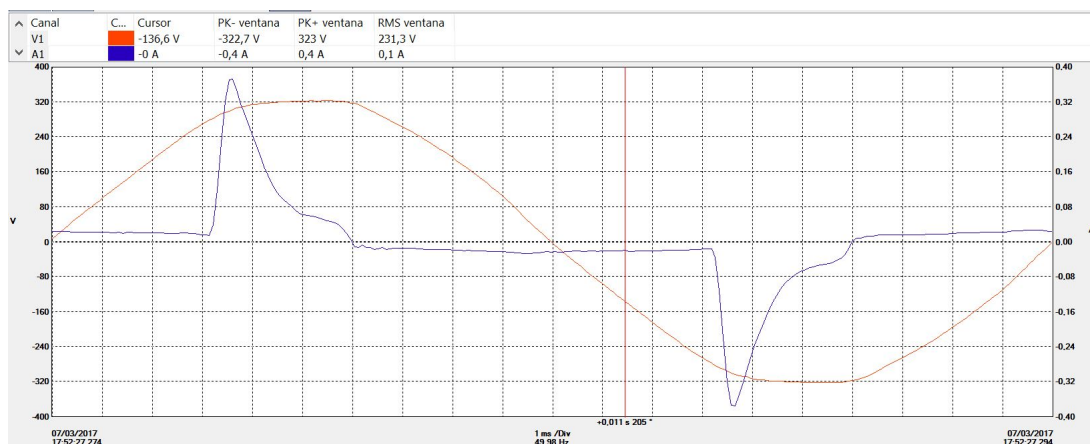


Figura 10.2.0.4 – Forma de onda de la luminaria 2 (dos luminarias)

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	231,3
A rms	A	0,095
F	Hz	49,98
V THDr	% r	1,5
A THDr	% r	78
φ	°	-32
P (W)	W	11,73
Q (var)	var	-7,379
D (var)	var	17,13
S (VA)	VA	22,04
PF		0,532
Cos φ (DPF)		0,844

Tabla 10.2.0.4 – Parámetros de la luminaria 2 (dos luminarias)

Los armónicos de las dos luminarias en paralelo se pueden observar en la tabla 10.2.0.5 y el espectro de los impares de intensidad en la figura 10.2.0.5:

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	% f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	231,3	0	1	100	0,06	0	26	0,2	0,00012	-172
2	0	0	---	2	0,2	0,00012	-145	27	9	0,0054	10
3	0,2	0,4626	176	3	76,4	0,04584	133	28	0,2	0,00012	27
4	0	0	---	4	0,2	0,00012	-33	29	8,2	0,00492	175
5	0,7	1,1565	135	5	56,5	0,0339	-71	30	0,2	0,00012	-160
6	0	0	---	6	0,1	0,00006	100	31	6,1	0,00366	-10
7	1,2	2,7756	45	7	40	0,024	96	32	0,2	0,00012	-6
8	0	0	---	8	0,2	0,00012	-145	33	5,3	0,00318	170
9	0,4	0,9252	-170	9	37,2	0,02232	-92	34	0,2	0,00012	179
10	0	0	---	10	0,3	0,00018	7	35	5,5	0,0033	-18
11	0,2	0,2313	47	11	34,4	0,02064	72	36	0,1	0,00006	-21
12	0	0	---	12	0,4	0,00024	149	37	4,8	0,00288	148
13	0,2	0,4626	138	13	27,4	0,01644	-128	38	0,1	0,00006	128
14	0	0	---	14	0,4	0,00024	-59	39	3,4	0,00204	-40
15	0,1	0,2313	-137	15	19,6	0,01176	44	40	0,1	0,00006	-63
16	0	0	---	16	0,4	0,00024	98	41	3,1	0,00186	144
17	0	0	---	17	16,4	0,00984	-136	42	0	0	---
18	0	0	---	18	0,4	0,00024	-113	43	3,2	0,00192	-45
19	0	0,2313	-159	19	16	0,0096	35	44	0	0	---
20	0	0	---	20	0,3	0,00018	54	45	2,6	0,00156	118
21	0	0	---	21	13,4	0,00804	-158	46	0,1	0,00006	-174
22	0	0	---	22	0,3	0,00018	-132	47	1,9	0,00114	-66
23	0	0	---	23	10,6	0,00636	14	48	0,1	0,00006	-27
24	0	0	---	24	0,3	0,00018	22	49	1,6	0,00096	120
25	0	0	---	25	9,1	0,00546	-163	50	0	0	---

Tabla 10.2.0.5 – Armónicos de la luminaria 2 (dos luminarias)

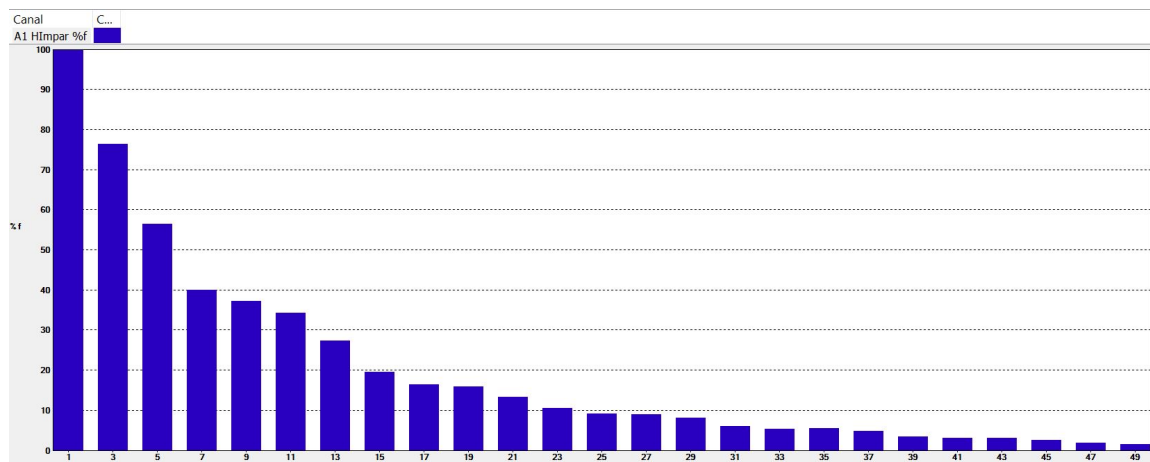


Figura 10.2.0.5 – Espectro armónico de la luminaria 2 (Armónicos impares de corriente, dos luminarias)

Se comprueba de nuevo que se cumple:

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.2.0.3)$$

Calculando el sumatorio con los primeros 25 armónicos impares:

$$D = 231,3 * \sqrt{(0,04584^2) + (0,0339^2) + (0,024^2) + \dots} = 16,86V Ar \quad (10.2.0.4)$$

El valor obtenido es muy similar al presentado en la tabla 10.2.0.2, que es el calculado por el analizador de redes y es de 17,13 VAR.

10.3. Luminaria 3 - LED

En la tabla y figura siguientes se pueden ver las características de la luminaria:

Luminaria	3
Tipo	LED
Marca	Led
Potencia (W)	6
Lúmenes	400
Duración	>10000 on/off
Calificación energética	A+

Tabla 10.3.0.1 – Características de la luminaria 3



Figura 10.3.0.1 – Luminaria 3

Del mismo modo, se presenta en la figura 10.3.0.2 la forma de onda de dicha luminaria, y en la tabla 10.3.0.2 los parámetros más importantes que definen su comportamiento,

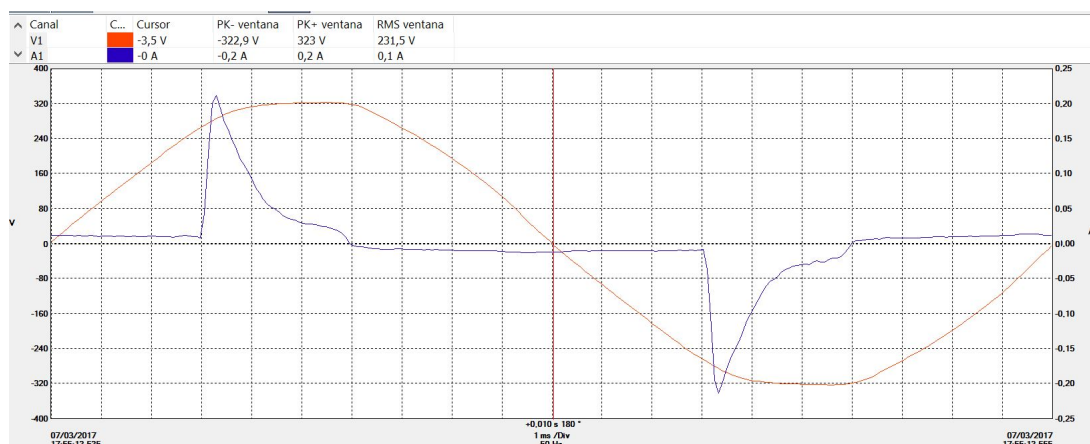


Figura 10.3.0.2 – Forma de onda de la luminaria 3

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	231,4
A rms	A	0,051
F	Hz	50
V THDr	% r	1,5
A THDr	% r	77,4
φ	°	-35
P (W)	W	6,169
Q (var)	var	-4,270
D (var)	var	9,096
S (VA)	VA	11,79
PF		0,523
$\text{Cos}\varphi(\text{DPF})$		0,819

Tabla 10.3.0.2 – Parámetros de la luminaria 3

Finalmente, se muestra la tabla 10.3.0.3 de armónicos de tensión y corriente y el espectro armónico.

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	% f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	231,4	0	1	100	0,032	0	26	0,2	0,000064	-69
2	0	0	---	2	0,2	0,000064	-108	27	10,8	0,003456	70
3	0,2	0,4628	-175	3	73,7	0,023584	139	28	0,2	0,000064	78
4	0	0	---	4	0	0	---	29	9	0,00288	-111
5	0,7	1,6198	141	5	52,7	0,016864	-59	30	0,2	0,000064	-97
6	0	0	---	6	0	0	---	31	9,1	0,002912	72
7	1,2	2,7768	49	7	39	0,01248	118	32	0,3	0,000096	71
8	0	0	---	8	0,3	0,000096	-171	33	8,9	0,002848	-115
9	0,4	0,9256	-172	9	38	0,01216	-70	34	0,3	0,000096	-109
10	0	0	---	10	0,4	0,000128	-2	35	7,5	0,0024	57
11	0,2	0,4628	41	11	33,3	0,010656	96	36	0,3	0,000096	72
12	0	0	---	12	0,4	0,000128	148	37	6,3	0,002016	-120
13	0,2	0,4628	135	13	24,2	0,007744	-95	38	0,3	0,000096	-107
14	0	0	---	14	0,5	0,00016	-42	39	6,3	0,002016	62
15	0,1	0,2314	-141	15	19,5	0,00624	89	40	0,3	0,000096	79
16	0	0	---	16	0,5	0,00016	115	41	5,8	0,001856	-124
17	0	0	---	17	18,7	0,005984	-92	42	0,3	0,000096	-100
18	0	0	---	18	0,4	0,000128	-79	43	4,9	0,001568	55
19	0	0	---	19	16,6	0,005312	79	44	0,4	0,000128	68
20	0	0	---	20	0,4	0,000128	103	45	4,8	0,001536	-122
21	0	0	---	21	13,5	0,00432	-102	46	0,4	0,000128	-115
22	0	0	---	22	0,4	0,000128	-87	47	4,8	0,001536	53
23	0	0	---	23	12	0,00384	80	48	0,4	0,000128	57
24	0	0	---	24	0,3	0,000096	99	49	4,2	0,001344	-135
25	0	0	---	25	12,2	0,003904	-103	50	0,3	0,000096	-135

Tabla 10.3.0.3 – Armónicos de la luminaria 3

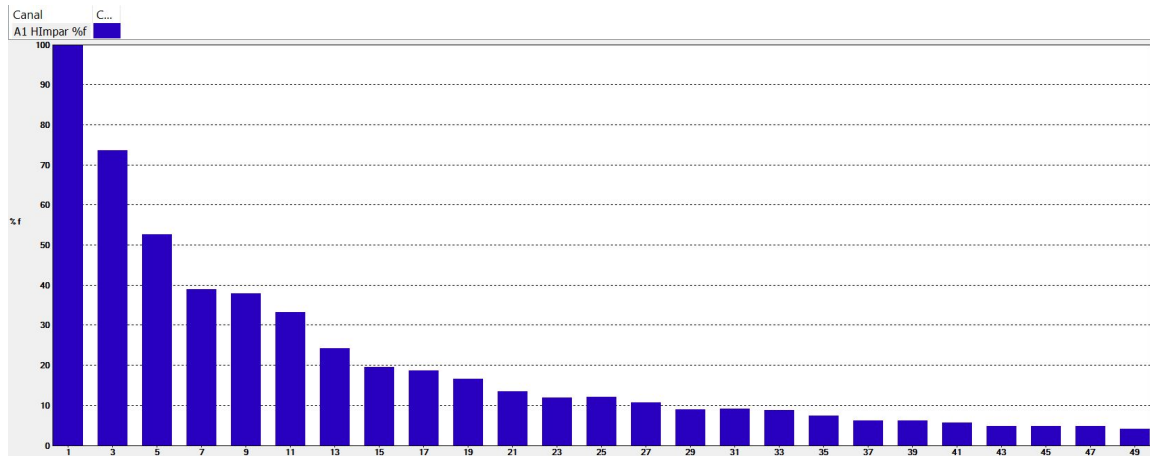


Figura 10.3.0.3 – Espectro armónico de la luminaria 3 (Armónicos impares de corriente)

Comprobación de los cálculos de la potencia de distorsión:

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.3.0.1)$$

Calculando el sumatorio con los primeros 25 armónicos impares:

$$D = 231,4 * \sqrt{(0,023584^2) + (0,016864^2) + (0,01248^2) + \dots} = 8,797VAr \quad (10.3.0.2)$$

El valor obtenido es prácticamente idéntico al presentado en la tabla 10.3.0.2, que es el calculado por el analizador de redes y es de 9,096 VAR.

10.4. Luminaria 4 - Philips LED

La luminaria 4 es una tipo LED de marca Philips, con las siguientes características:

Luminaria	4
Tipo	LED
Marca	Philips
Potencia (W)	11
Lúmenes	1055
Duración	15000 h
Calificación energética	A+

Tabla 10.4.0.1 – Características de la luminaria 4



Figura 10.4.0.1 – Luminaria 4

Se presentan, al igual que en los casos anteriores, una figura con su forma de onda y los parámetros más importantes a tener en cuenta.

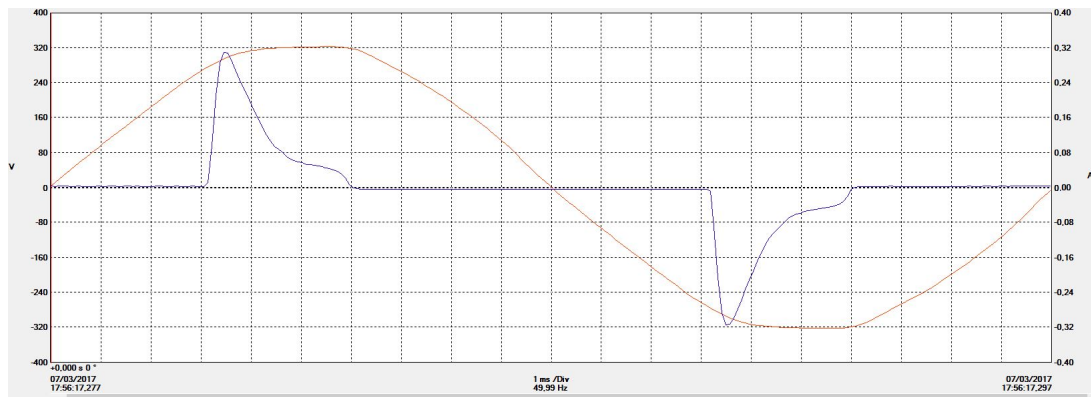


Figura 10.4.0.2 – Forma de onda de la luminaria 4

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	231,5
A rms	A	0,081
F	Hz	49,99
V THDr	% r	1,6
A THDr	% r	80,5
φ	°	-21
P (W)	W	10,54
Q (var)	var	-3,967
D (var)	var	15,09
S (VA)	VA	18,83
PF		0,56
$\text{Cos}\varphi(\text{DPF})$		0,935

Tabla 10.4.0.2 – Parámetros de la luminaria 4

También se muestra la tabla que contiene las componentes armónicas de la tensión y corriente obtenidas con el analizador, y un gráfico de barras con el espectro armónico de las componentes impares de corriente.

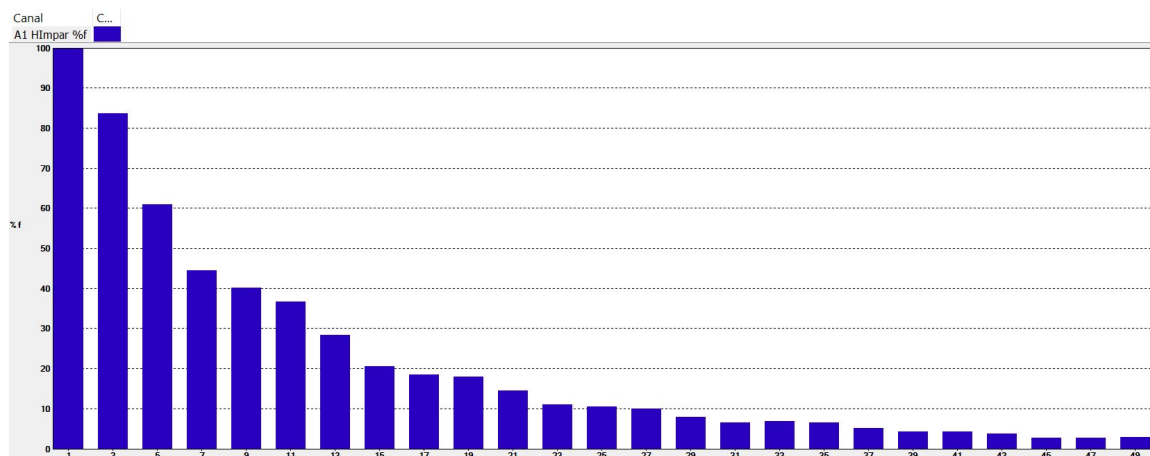


Figura 10.4.0.3 – Espectro armónico de la luminaria 4 (Armónicos impares de corriente)

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	% f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	231,4	0	1	100	0,048	0	26	0,3	0,000144	180
2	0	0	---	2	0,3	0,000144	-125	27	10,1	0,004848	21
3	0,3	0,6942	-175	3	83,7	0,040176	172	28	0,2	0,000096	46
4	0	0	---	4	0,1	0,000048	21	29	8	0,00384	-141
5	0,8	1,8512	135	5	61	0,02928	-4	30	0,2	0,000096	-120
6	0	0	---	6	0,2	0,000096	126	31	6,6	0,003168	70
7	1,3	3,0082	49	7	44,5	0,02136	-167	32	0,2	0,000096	70
8	0	0	---	8	0,3	0,000144	-70	33	7	0,00336	-85
9	0,3	0,6942	-163	9	40,2	0,019296	33	34	0,1	0,000048	-96
10	0	0	---	10	0,4	0,000192	112	35	6,6	0,003168	108
11	0,1	0,2314	41	11	36,8	0,017664	-137	36	0,1	0,000048	133
12	0	0	---	12	0,5	0,00024	-71	37	5,2	0,002496	-53
13	0,2	0,4628	142	13	28,5	0,01368	53	38	0,1	0,000048	-34
14	0	0	---	14	0,6	0,000288	107	39	4,4	0,002112	157
15	0,1	0,2314	-147	15	20,6	0,009888	-105	40	0,1	0,000048	-178
16	0	0	---	16	0,5	0,00024	-70	41	4,4	0,002112	-1
17	0	0	---	17	18,6	0,008928	102	42	0,1	0,000048	61
18	0	0	---	18	0,4	0,000192	128	43	3,8	0,001824	-167
19	0	0	---	19	18	0,00864	-61	44	0,1	0,000048	-100
20	0	0	---	20	0,4	0,000192	-26	45	2,8	0,001344	40
21	0	0	---	21	14,6	0,007008	132	46	0,1	0,000048	85
22	0	0	---	22	0,5	0,00024	164	47	2,7	0,001296	-105
23	0	0	---	23	11,1	0,005328	-23	48	0,1	0,000048	-54
24	0	0	---	24	0,4	0,000192	-12	49	3	0,00144	93
25	0	0	---	25	10,6	0,005088	-175	50	0,1	0,000048	153

Tabla 10.4.0.3 – Armónicos de la luminaria 4

Cálculo de la potencia de distorsión:

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.4.0.1)$$

Calculando el sumatorio con los primeros 25 armónicos impares:

$$D = 231,5 * \sqrt{(0,040176^2) + (0,02928^2) + (0,02136^2) + \dots} = 14,66 \text{ VAr} \quad (10.4.0.2)$$

El valor obtenido se puede comparar con el presentado en la tabla 10.4.0.2, que es el calculado por el analizador y corresponde a 15,09 VAr.

10.5. Luminaria 5 - Roblan LED

Luminaria marca Roblan de tipo LED, que presenta los siguientes valores otorgados por el fabricante en su caja:

Luminaria	5
Tipo	LED
Marca	Roblan
Potencia (W)	10
Lúmenes	806
Duración	25000 h
Calificación energética	A+

Tabla 10.5.0.1 – Características de la luminaria 5



Figura 10.5.0.1 – Luminaria 5

Se presentan la forma de onda de la luminaria y los parámetros medidos con el analizador de redes en la siguiente figura 10.5.0.2 y la tabla 10.5.0.2.

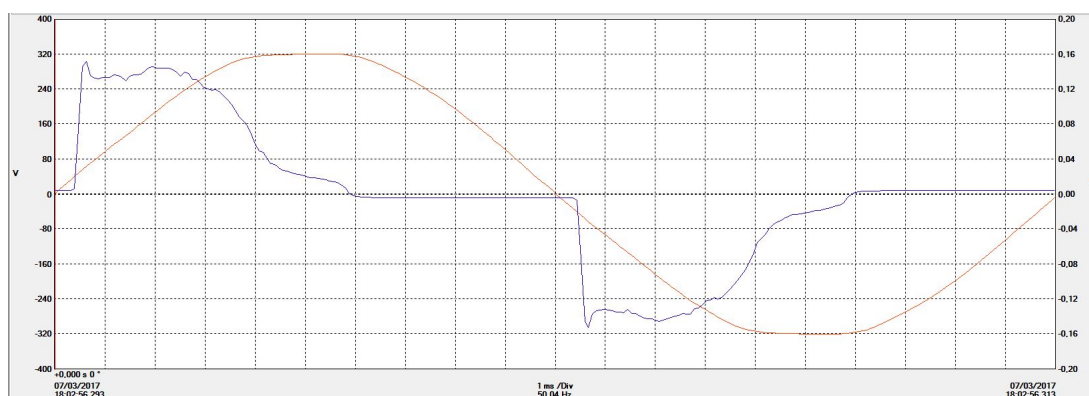


Figura 10.5.0.2 – Forma de onda de la luminaria 5

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	231,3
A rms	A	0,077
F	Hz	50,04
V THDr	% r	1,6
A THDr	% r	52,2
φ	°	-51
P (W)	W	9,70
Q (var)	var	-11,60
D (var)	var	9,397
S (VA)	VA	17,81
PF		0,545
Cos φ (DPF)		0,643

Tabla 10.5.0.2 – Parámetros de la luminaria 5

Finalmente, se muestran la tabla de armónicos y el espectro armónico correspondiente a las componentes impares de corriente.

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	% f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	231,3	0	1	100	0,065	0	26	0,1	0,000065	-3
2	0	0	---	2	0	0	---	27	3,6	0,00234	-125
3	0,3	0,6939	-173	3	53,9	0,035035	180	28	0,1	0,000065	-104
4	0	0	---	4	0	0	---	29	3,5	0,002275	110
5	1,3	3,0069	159	5	16,1	0,010465	39	30	0,1	0,000065	109
6	0	0	---	6	0,1	0,000065	-131	31	3,5	0,002275	-3
7	0,8	1,8504	28	7	8,6	0,00559	-31	32	0,1	0,000065	-19
8	0	0	---	8	0,4	0,00026	43	33	3,1	0,002015	-135
9	0,3	0,6939	-146	9	12,6	0,00819	-159	34	0,1	0,000065	-127
10	0	0	---	10	0,3	0,000195	-131	35	2,6	0,00169	122
11	0,2	0,4626	5	11	5,8	0,00377	74	36	0,1	0,000065	92
12	0	0	---	12	0,1	0,000065	67	37	3	0,00195	2
13	0	0	---	13	8,5	0,005525	-21	38	0	0	---
14	0	0	---	14	0	0	---	39	2,9	0,001885	-127
15	0,1	0,2313	-144	15	7,1	0,004615	-158	40	0,1	0,000065	-69
16	0	0	---	16	0,1	0,000065	-90	41	2	0,0013	119
17	0	0	---	17	5,6	0,00364	82	42	0,1	0,000065	98
18	0	0	---	18	0,1	0,000065	83	43	2,5	0,001625	5
19	0	0	---	19	4,3	0,002795	-19	44	0	0	---
20	0	0	---	20	0	0	---	45	1,9	0,001235	-121
21	0	0	---	21	5,1	0,003315	-146	46	0	0	---
22	0	0	---	22	0,1	0,000065	-87	47	1,9	0,001235	131
23	0	0	---	23	3,5	0,002275	99	48	0	0	---
24	0	0	---	24	0,2	0,00013	115	49	1,9	0,001235	11
25	0	0	---	25	3,6	0,00234	-14	50	0	0	---

Tabla 10.5.0.3 – Armónicos de la luminaria 5

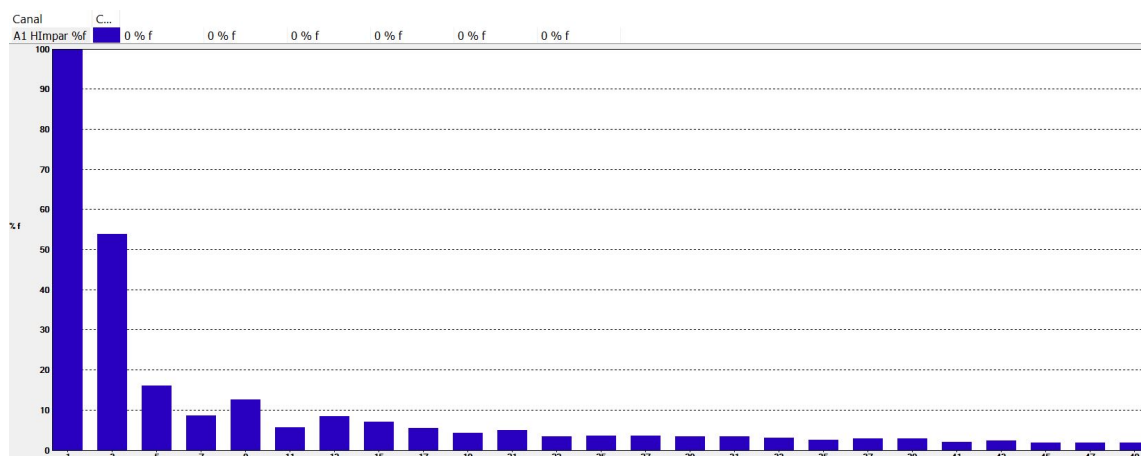


Figura 10.5.0.3 – Espectro armónico de la luminaria 5 (Armónicos impares de corriente)

Se realiza de nuevo el cálculo para la potencia de distorsión:

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.5.0.1)$$

Calculando el sumatorio con los primeros 25 armónicos impares:

$$D = 231,3 * \sqrt{(0,035035^2) + (0,010465^2) + (0,00559^2) + \dots} = 8,969 \text{ VAr} \quad (10.5.0.2)$$

Se puede comprobar que el valor obtenido casi coincide con los 9,397 VAr de la tabla 10.5.0.2, medidos con el analizador.

10.6. Luminaria 6 - H2V LED

Luminaria de tipo LED, de la marca H2V, que presenta las características mostradas en la siguiente tabla:

Luminaria	6
Tipo	LED
Marca	H2V
Potencia (W)	9
Lúmenes	806
Duración	>15000 on/off
Calificación energética	A+

Tabla 10.6.0.1 – Características de la luminaria 6



Figura 10.6.0.1 – Luminaria 6

En la figura 10.6.0.2 se observa su forma de onda, y también sus parámetros básicos medidos en la tabla 10.6.0.2.

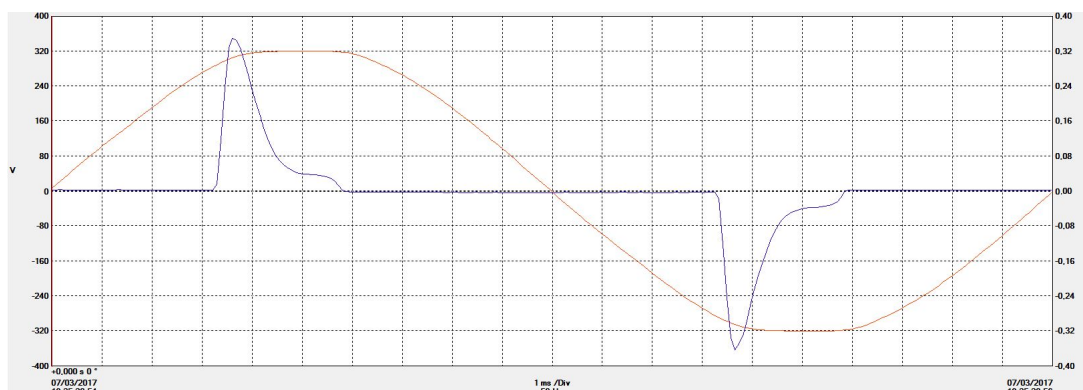


Figura 10.6.0.2 – Forma de onda de la luminaria 6

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	231,5
A rms	A	0,084
F	Hz	50
V THDr	% r	1,6
A THDr	% r	85,2
φ	°	-20
P (W)	W	9,632
Q (var)	var	-3,474
D (var)	var	16,51
S (VA)	VA	19,43
PF		0,496
Cos φ (DPF)		0,939

Tabla 10.6.0.2 – Parámetros de la luminaria 6

En la siguiente tabla y en la figura 10.6.0.3, se muestran los resultados referentes a los armónicos estudiados:

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	% f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	231,5	0	1	100	0,044	0	26	0,3	0,000132	-169
2	0	0	---	2	0,6	0,000264	-139	27	10,8	0,004752	-66
3	0,3	0,6945	-177	3	88,8	0,039072	173	28	0,2	0,000088	16
4	0	0	---	4	0,5	0,00022	16	29	10,5	0,00462	132
5	1,2	2,778	160	5	72,5	0,0319	-8	30	0,2	0,000088	-161
6	0	0	---	6	0,7	0,000308	-178	31	9,7	0,004268	-37
7	0,9	2,0835	20	7	58,3	0,025652	178	32	0,1	0,000044	30
8	0	0	---	8	0,7	0,000308	-13	33	8	0,00352	154
9	0,3	0,6945	-149	9	51,1	0,022484	9	34	0,1	0,000044	-158
10	0	0	---	10	0,7	0,000308	160	35	6,6	0,002904	-6
11	0,2	0,463	3	11	47,2	0,020768	-164	36	0	0	---
12	0	0	---	12	0,6	0,000264	-14	37	6,2	0,002728	-167
13	0,1	0,2315	-159	13	41,2	0,018128	19	38	0	0	---
14	0	0	---	14	0,6	0,000264	165	39	5,8	0,002552	26
15	0	0	---	15	32,5	0,0143	-155	40	0	0	---
16	0	0	---	16	0,5	0,00022	-14	41	4,7	0,002068	-141
17	0	0	---	17	24,6	0,010824	37	42	0	0	---
18	0	0	---	18	0,5	0,00022	170	43	3,8	0,001672	61
19	0	0	---	19	20,7	0,009108	-124	44	0	0	---
20	0	0	---	20	0,5	0,00022	-2	45	3,7	0,001628	-95
21	0	0	---	21	19	0,00836	69	46	0	0	---
22	0	0	---	22	0,4	0,000176	-171	47	3,8	0,001672	99
23	0	0	---	23	16,4	0,007216	-101	48	0	0	---
24	0	0	---	24	0,4	0,000176	10	49	3,3	0,001452	-71
25	0	0	---	25	12,8	0,005632	93	50	0	0	---

Tabla 10.6.0.3 – Armónicos de la luminaria 6

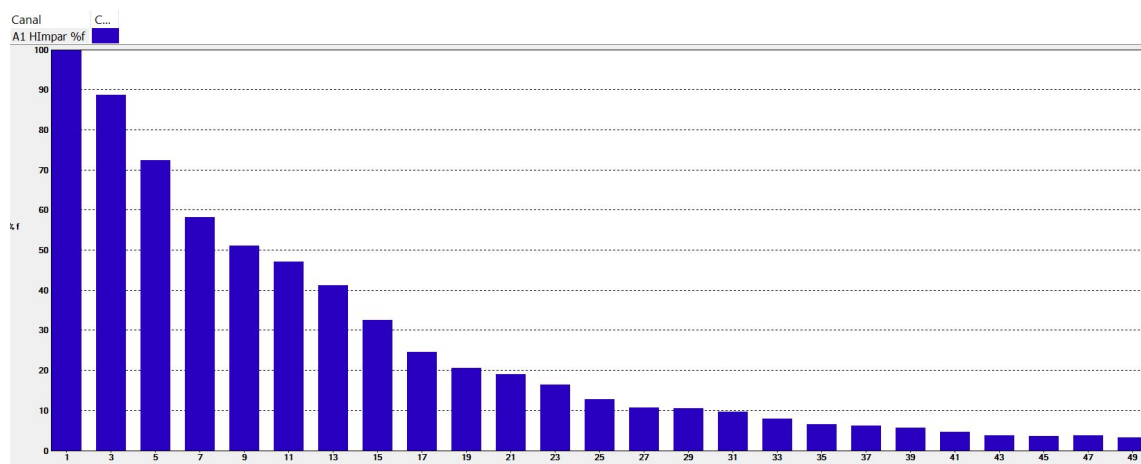


Figura 10.6.0.3 – Espectro armónico de la luminaria 6 (Armónicos impares de corriente)

Comprobación de los cálculos de la potencia de distorsión:

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.6.0.1)$$

Calculando el sumatorio con los primeros 25 armónicos impares:

$$D = 231,5 * \sqrt{(0,039072^2) + (0,0319^2) + (0,025652^2) + \dots} = 15,84 \text{ VAr} \quad (10.6.0.2)$$

Se observa que el resultado de esta operación es similar al valor de 16,51 VAr dado en la tabla 10.6.0.2.

10.7. Luminaria 7 - Lexman CFL

Esta luminaria Lexman es de tipo CFL, es decir, de bajo consumo. Sus características aparecen representadas en la tabla 10.7.0.1.

Luminaria	7
Tipo	CFL
Marca	Lexman
Potencia (W)	23
Lúmenes	1398
Duración	10000 h
Calificación energética	A

Tabla 10.7.0.1 – Características de la luminaria 7



Figura 10.7.0.1 – Luminaria 7

Características de una sola luminaria

Se presentan la forma de onda y parámetros básicos para el caso de una sola luminaria de este tipo en la figura 10.7.0.2 y tabla 10.7.0.2:

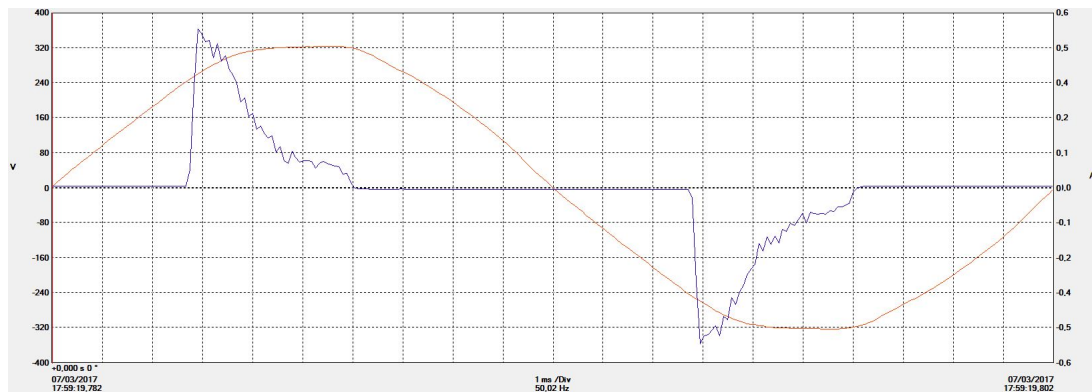


Figura 10.7.0.2 – Forma de onda de la luminaria 7 (una luminaria)

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	231,8
A rms	A	0,158
F	Hz	50,02
V THDr	% r	1,5
A THDr	% r	76,9
φ	°	-25
P (W)	W	21,36
Q (var)	var	-10,06
D (var)	var	28,14
S (VA)	VA	36,73
PF		0,582
Cos φ (DPF)		0,903

Tabla 10.7.0.2 – Parámetros de la luminaria 7 (una luminaria)

Igual que en el caso anterior, para poder comparar los armónicos generados por una sola luminaria y dos en paralelo, se presenta la tabla con los calculados para una luminaria y su espectro armónico.

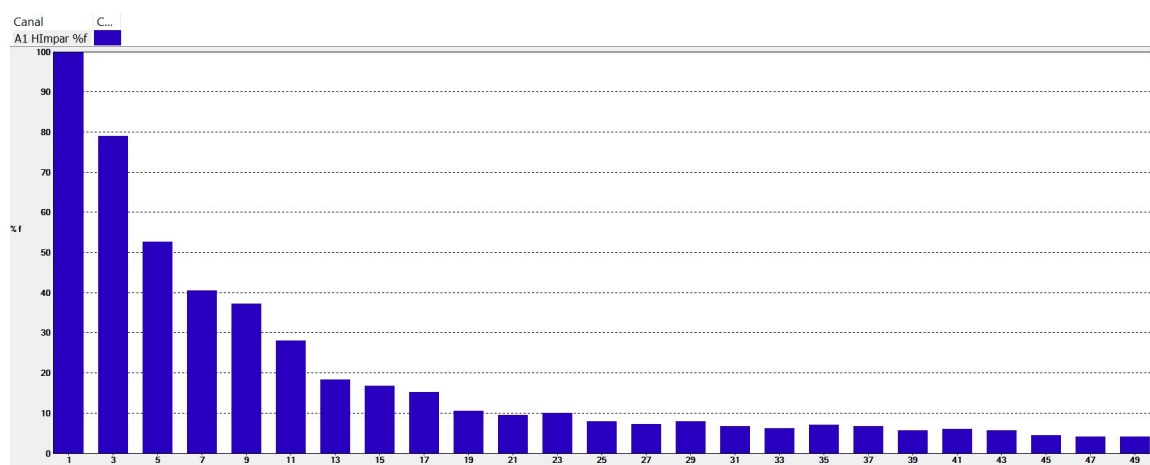


Figura 10.7.0.3 – Espectro armónico de la luminaria 7 (Armónicos impares de corriente, una luminaria)

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	% f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	231,7	0	1	100	0,101	0	26	0,4	0,000404	-19
2	0	0	---	2	0,1	0,000101	-91	27	7,2	0,007272	127
3	0,3	0,6951	178	3	79	0,07979	175	28	0,5	0,000505	174
4	0	0	---	4	0,2	0,000202	-151	29	7,9	0,007979	-26
5	0,7	1,6219	138	5	52,7	0,053227	6	30	0,6	0,000606	1
6	0	0	---	6	0,4	0,000404	44	31	6,8	0,006868	177
7	1,2	2,7804	48	7	40,5	0,040905	-149	32	0,6	0,000606	-172
8	0	0	---	8	0,5	0,000505	-139	33	6,3	0,006363	35
9	0,4	0,9268	-172	9	37,2	0,037572	49	34	0,3	0,000303	15
10	0	0	---	10	0,5	0,000505	62	35	7,1	0,007171	-116
11	0,2	0,4634	44	11	28,1	0,028381	-118	36	0,1	0,000101	-103
12	0	0	---	12	0,5	0,000505	-102	37	6,7	0,006767	83
13	0,2	0,4634	133	13	18,3	0,018483	90	38	0,3	0,000303	136
14	0	0	---	14	0,5	0,000505	82	39	5,8	0,005858	-68
15	0,1	0,2317	-142	15	16,8	0,016968	-53	40	0,5	0,000505	-30
16	0	0	---	16	0,2	0,000202	-92	41	6	0,00606	142
17	0	0	---	17	15,3	0,015453	146	42	0,6	0,000606	160
18	0	0	---	18	0,1	0,000101	167	43	5,7	0,005757	-18
19	0	0	---	19	10,6	0,010706	-7	44	0,6	0,000606	-18
20	0	0	---	20	0,2	0,000202	23	45	4,5	0,004545	-173
21	0	0	---	21	9,6	0,009696	-144	46	0,5	0,000505	152
22	0	0	---	22	0,1	0,000101	-133	47	4,2	0,004242	42
23	0	0	---	23	10	0,0101	60	48	0,2	0,000202	-68
24	0	0	---	24	0,1	0,000101	141	49	4,1	0,004141	-111
25	0	0	---	25	7,9	0,007979	-94	50	0,2	0,000202	19

Tabla 10.7.0.3 – Armónicos de la luminaria 7 (una luminaria)

Se calcula con la fórmula la potencia de distorsión:

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.7.0.1)$$

Calculando el sumatorio con los primeros 25 armónicos impares:

$$D = 231,8 * \sqrt{(0,07979^2) + (0,053227^2) + (0,040905^2) + \dots} = 27,85 \text{ VAr} \quad (10.7.0.2)$$

Se puede comprobar que los 27.85 VAr obtenidos con el cálculo son similares a los 28,14 VAr de la tabla correspondiente, calculados con el analizador.

Características de dos luminarias en paralelo

Ahora se realizan los cálculos para dos luminarias en paralelo de este modelo, presentado la forma de onda y sus parámetros:

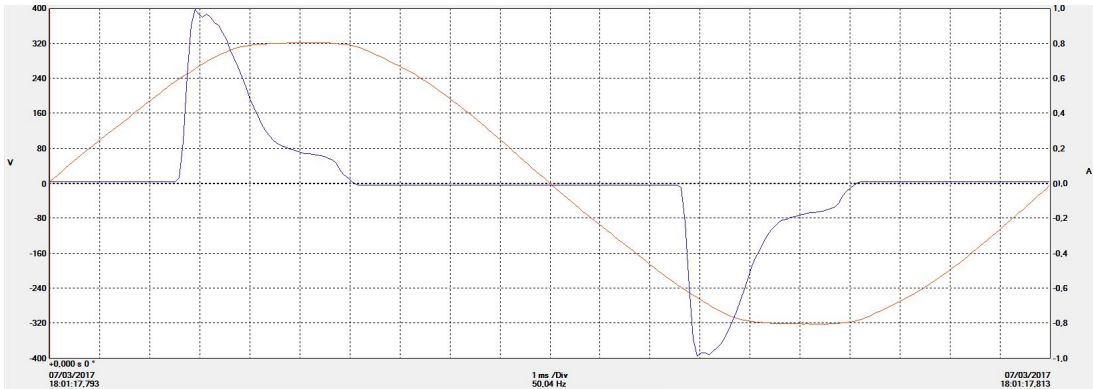


Figura 10.7.0.4 – Forma de onda de la luminaria 7 (dos luminarias)

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	232,1
A rms	A	0,316
F	Hz	50,04
V THDr	% r	1,5
A THDr	% r	76,2
φ	°	-26
P (W)	W	43,15
Q (var)	var	-20,65
D (var)	var	55.52
S (VA)	VA	73.29
PF		0,589
Cos φ (DPF)		0.9

Tabla 10.7.0.4 – Parámetros de la luminaria 7 (dos luminarias)

En la tabla 10.7.0.5 se muestran los armónicos para dos luminarias de este tipo, y una figura con el espectro armónico.

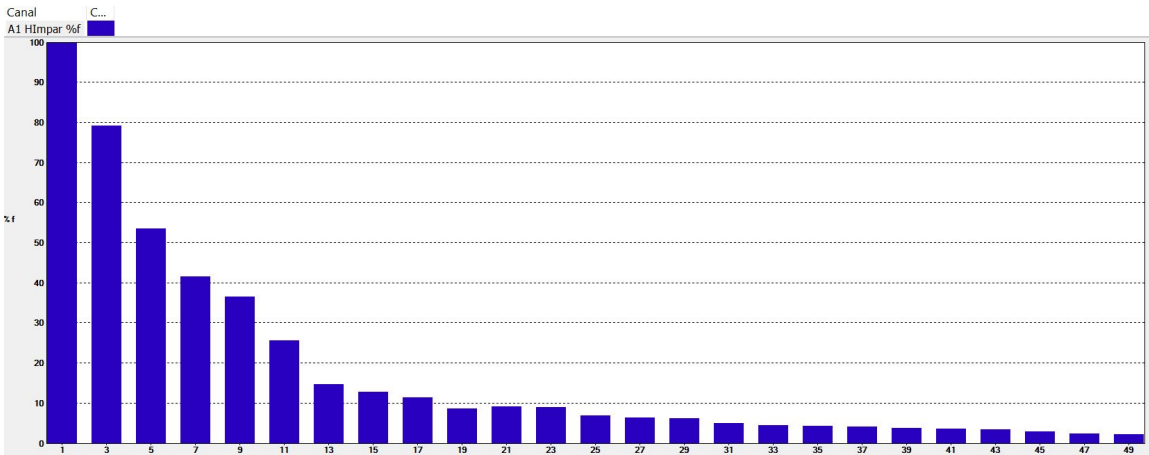


Figura 10.7.0.5 – Espectro armónico de la luminaria 7 (Armónicos impares de corriente, dos luminarias)

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	% f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	232,1	0	1	100	0,204	0	26	0,2	0,000408	-33
2	0	0	---	2	0	0	---	27	6,4	0,013056	141
3	0,3	0,6963	173	3	79,2	0,161568	177	28	0,2	0,000408	157
4	0	0	---	4	0,1	0,000204	-74	29	6,2	0,012648	-12
5	1,2	2,7852	155	5	53,6	0,109344	9	30	0,2	0,000408	-2
6	0	0	---	6	0,3	0,000612	95	31	5,1	0,010404	-164
7	0,8	1,8568	26	7	41,6	0,084864	-147	32	0,2	0,000408	-162
8	0	0	---	8	0,4	0,000816	-83	33	4,5	0,00918	52
9	0,3	0,6963	-151	9	36,5	0,07446	49	34	0,2	0,000408	25
10	0	0	---	10	0,5	0,00102	105	35	4,4	0,008976	-96
11	0,2	0,4642	9	11	25,6	0,052224	-119	36	0,1	0,000204	-141
12	0	0	---	12	0,6	0,001224	-68	37	4,1	0,008364	113
13	0	0	---	13	14,7	0,029988	92	38	0	0	---
14	0	0	---	14	0,6	0,001224	119	39	3,8	0,007752	-36
15	0,1	0,2321	-140	15	12,9	0,026316	-45	40	0,1	0,000204	-45
16	0	0	---	16	0,5	0,00102	-53	41	3,7	0,007548	173
17	0	0	---	17	11,4	0,023256	161	42	0	0	---
18	0	0	---	18	0,3	0,000612	145	43	3,4	0,006936	18
19	0	0	---	19	8,6	0,017544	18	44	0	0	---
20	0	0	---	20	0,2	0,000408	-5	45	2,9	0,005916	-135
21	0	0	---	21	9,2	0,018768	-124	46	0,1	0,000204	-96
22	0	0	---	22	0,1	0,000204	-167	47	2,5	0,0051	77
23	0	0	---	23	9	0,01836	77	48	0,1	0,000204	89
24	0	0	---	24	0	0	---	49	2,3	0,004692	-72
25	0	0	---	25	7	0,01428	-76	50	0,1	0,000204	-54

Tabla 10.7.0.5 – Armónicos de la luminaria 7 (dos luminarias)

Cálculo de la potencia de distorsión con su fórmula correspondiente:

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.7.0.3)$$

Calculando el sumatorio con los primeros 25 armónicos impares:

$$D = 232,1 * \sqrt{(0,161568^2) + (0,109344^2) + (0,084864^2) + \dots} = 55,53VAr \quad (10.7.0.4)$$

El resultado de la ecuación anterior casi coincide con el valor de la potencia de distorsión mostrado en la tabla 10.7.0.4.

10.8. Luminaria 8 - Lexman CFL

Se realizarán las medidas, igual que en el caso anterior, para dos luminarias idénticas en paralelo. Primero se muestran los datos para una sola luminaria:

Luminaria	8
Tipo	CFL
Marca	Lexman
Potencia (W)	22
Lúmenes	1297
Duración	6000 h
Calificación energética	A



Tabla 10.8.0.1 – Características de la luminaria 8

Figura 10.8.0.1 – Luminaria 8

En la figura 10.8.0.2 y la tabla 10.8.0.2 se presentan su forma de onda y sus parámetros básicos.

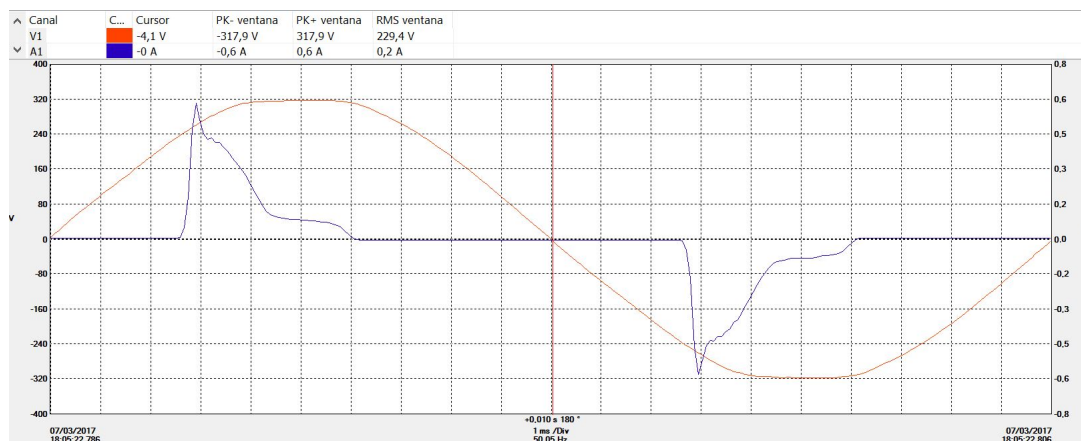


Figura 10.8.0.2 – Forma de onda de la luminaria 8 (una luminaria)

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	229,3
A rms	A	0,159
F	Hz	50,05
V THDr	% r	1,6
A THDr	% r	77,4
φ	°	-26
P (W)	W	20,99
Q (var)	var	-9,986
D (var)	var	28,03
S (VA)	VA	36,42
PF		0,576
Cos φ (DPF)		0.901

Tabla 10.8.0.2 – Parámetros de la luminaria 8 (una luminaria)

Además, se muestra la tabla con los armónicos de tensión y corriente numerados y el espectro armónico (figura 10.8.0.3) para una luminaria.

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	%f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	229,2	0	1	100	0,1	0	26	0,2	0,0002	-53
2	0	0	---	2	0	0	---	27	9,4	0,0094	123
3	0,3	0,6876	-178	3	78,7	0,0787	176	28	0,2	0,0002	124
4	0	0	---	4	0,1	0,0001	-76	29	9,2	0,0092	-34
5	1,3	2,9796	163	5	53,8	0,0538	9	30	0,1	0,0001	-36
6	0	0	---	6	0,2	0,0002	94	31	7,8	0,0078	173
7	0,8	1,8336	17	7	43,5	0,0435	-149	32	0,1	0,0001	168
8	0	0	---	8	0,3	0,0003	-90	33	7,7	0,0077	27
9	0,3	0,6876	-151	9	38,4	0,0384	45	34	0,1	0,0001	1
10	0	0	---	10	0,3	0,0003	99	35	7,9	0,0079	-130
11	0,2	0,4584	-1	11	26,3	0,0263	-124	36	0,1	0,0001	-147
12	0	0	---	12	0,4	0,0004	-75	37	7	0,007	74
13	0	0	---	13	15	0,015	90	38	0	0	---
14	0	0	---	14	0,4	0,0004	108	39	6,6	0,0066	-77
15	0,1	0,2292	-135	15	14,6	0,0146	-46	40	0,1	0,0001	-61
16	0	0	---	16	0,3	0,0003	-58	41	6,5	0,0065	127
17	0	0	---	17	13,6	0,0136	160	42	0,1	0,0001	154
18	0	0	---	18	0,3	0,0003	138	43	5,8	0,0058	-30
19	0	0	---	19	11,8	0,0118	15	44	0,1	0,0001	16
20	0	0	---	20	0,2	0,0002	-37	45	5,2	0,0052	179
21	0	0	---	21	13	0,013	-136	46	0,1	0,0001	-151
22	0	0	---	22	0,1	0,0001	132	47	5	0,005	25
23	0	0	---	23	12,3	0,0123	62	48	0,1	0,0001	48
24	0	0	---	24	0	0	---	49	4,6	0,0046	-132
25	0	0	---	25	9,7	0,0097	-91	50	0,1	0,0001	-109

Tabla 10.8.0.3 – Armónicos de la luminaria 8 (una luminaria)

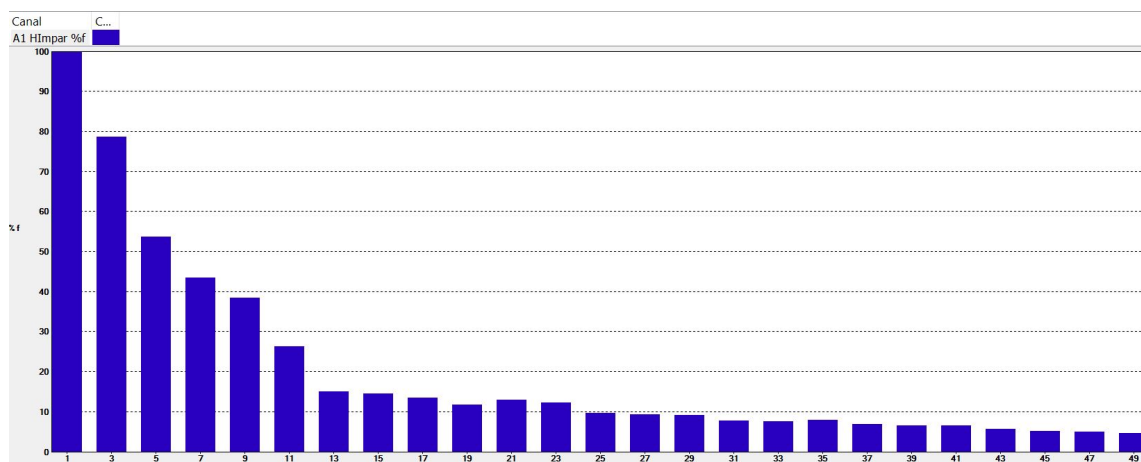


Figura 10.8.0.3 – Espectro armónico de la luminaria 8 (Armónicos impares de corriente, una luminaria)

Cálculo de la potencia de distorsión con su fórmula correspondiente:

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.8.0.1)$$

Calculando el sumatorio con los primeros 25 armónicos impares:

$$D = 229,3 * \sqrt{(0,0787^2) + (0,0538^2) + (0,0435^2) + \dots} = 27,93V Ar \quad (10.8.0.2)$$

Este resultado es muy parecido al valor de la potencia de distorsión mostrado en la tabla 10.8.0.2.

Igual que en casos anteriores, se repiten las medidas para dos luminarias en paralelo, dando como resultado la siguiente forma de onda y parámetros:

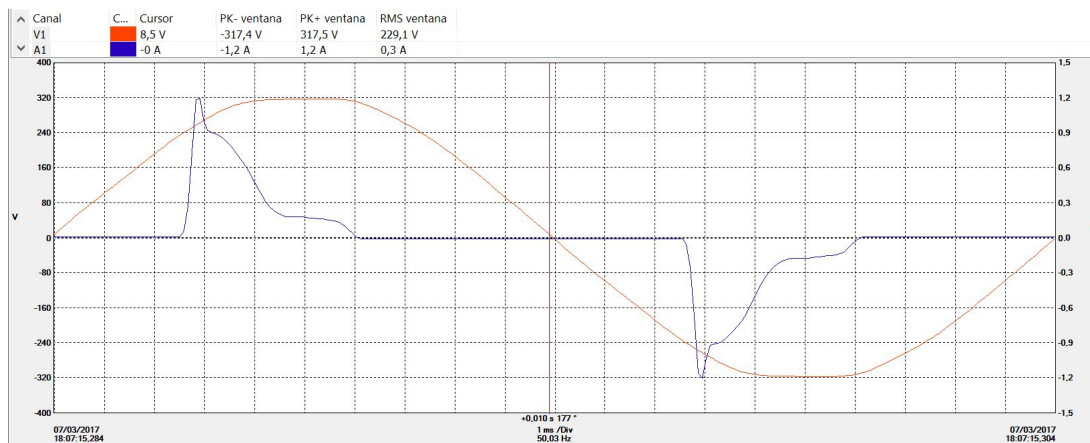


Figura 10.8.0.4 – Forma de onda de la luminaria 8 (dos luminarias)

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	229,1
A rms	A	0,32
F	Hz	50,03
V THDr	% r	1,6
A THDr	% r	77
φ	°	-25
P (W)	W	42,49
Q (var)	var	-20,02
D (var)	var	56,22
S (VA)	VA	73,25
PF		0,58
Cos φ (DPF)		0.903

Tabla 10.8.0.4 – Parámetros de la luminaria 8 (dos luminarias)

Se muestra también la tabla de armónicos y el espectro correspondiente.

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	%f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	229,1	0	1	100	0,203	0	26	0,2	0,000406	-74
2	0	0	---	2	0,1	0,000203	-117	27	9,5	0,019285	135
3	0,3	0,6873	176	3	78,5	0,159355	176	28	0,3	0,000609	136
4	0	0	---	4	0,1	0,000203	-108	29	9,2	0,018676	-22
5	1,3	2,9783	167	5	53,2	0,107996	9	30	0,3	0,000609	-20
6	0	0	---	6	0,3	0,000609	77	31	7,8	0,015834	-173
7	0,7	1,6037	20	7	42,6	0,086478	-147	32	0,3	0,000609	-179
8	0	0	---	8	0,4	0,000812	-98	33	7,7	0,015631	39
9	0,3	0,6873	-151	9	37,2	0,075516	48	34	0,2	0,000406	21
10	0	0	---	10	0,5	0,001015	93	35	7,6	0,015428	-117
11	0,3	0,6873	1	11	24,8	0,050344	-119	36	0,2	0,000406	-127
12	0	0	---	12	0,5	0,001015	-75	37	6,8	0,013804	89
13	0	0	---	13	14,4	0,029232	100	38	0,2	0,000406	79
14	0	0	---	14	0,5	0,001015	115	39	6,4	0,012992	-62
15	0,1	0,2291	-140	15	14,7	0,029841	-36	40	0,2	0,000406	-79
16	0	0	---	16	0,4	0,000812	-50	41	6,2	0,012586	142
17	0	0	---	17	13,7	0,027811	169	42	0,1	0,000203	146
18	0	0	---	18	0,3	0,000609	156	43	5,4	0,010962	-13
19	0	0	---	19	12,3	0,024969	24	44	0,2	0,000406	6
20	0	0	---	20	0,3	0,000609	3	45	4,9	0,009947	-163
21	0	0	---	21	13,3	0,026999	-128	46	0,2	0,000406	-158
22	0	0	---	22	0,2	0,000406	-146	47	4,7	0,009541	42
23	0	0	---	23	12	0,02436	71	48	0,2	0,000406	45
24	0	0	---	24	0,2	0,000406	75	49	4,2	0,008526	-114
25	0	0	---	25	9,5	0,019285	-79	50	0,2	0,000406	-109

Tabla 10.8.0.5 – Armónicos de la luminaria 8 (dos luminarias)

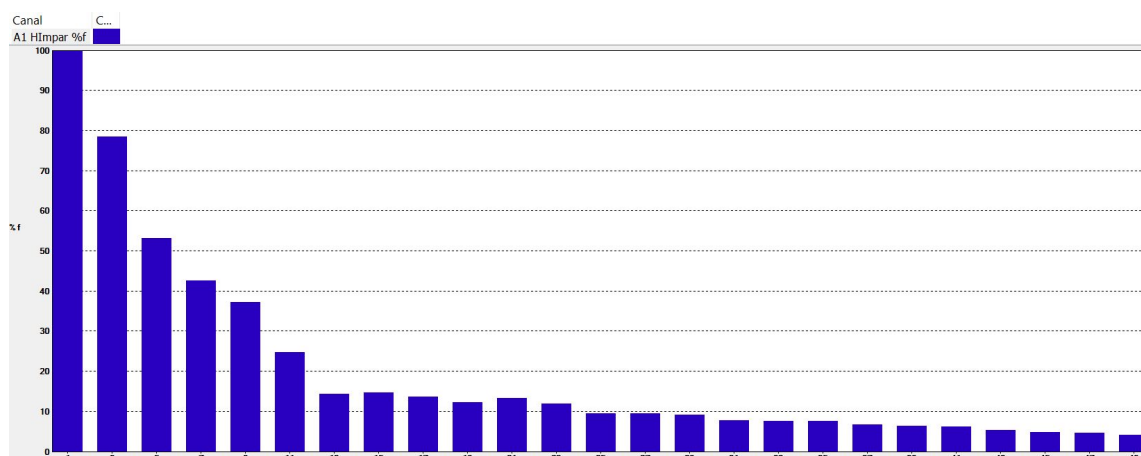


Figura 10.8.0.5 – Espectro armónico de la luminaria 8 (Armónicos impares de corriente, dos luminarias)

Se puede comprobar que los valores son muy similares a los obtenidos para una luminaria sola (algunos se duplican), y el espectro armónico es prácticamente el mismo.

Potencia de distorsión

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.8.0.3)$$

Calculando el sumatorio con los primeros 25 armónicos impares:

$$D = 229,1 * \sqrt{(0,159355^2) + (0,107996^2) + (0,086478^2) + \dots} = 55,54VAr \quad (10.8.0.4)$$

Valor comparable al de la potencia de distorsión en la tabla 10.8.0.4.

10.9. Luminaria 9 - Froiz CFL

Luminaria de marca Froiz, de bajo consumo, con las siguientes características mostradas en la tabla 10.9.0.1.

Luminaria	9
Tipo	CFL
Marca	Froiz
Potencia (W)	11
Lúmenes	600
Duración	8000 h
Calificación energética	A



Tabla 10.9.0.1 – Características de la luminaria 9

Figura 10.9.0.1 – Luminaria 9

De las medidas realizadas se obtienen la forma de onda de la figura y los parámetros mostrados en la tabla 10.9.0.2.

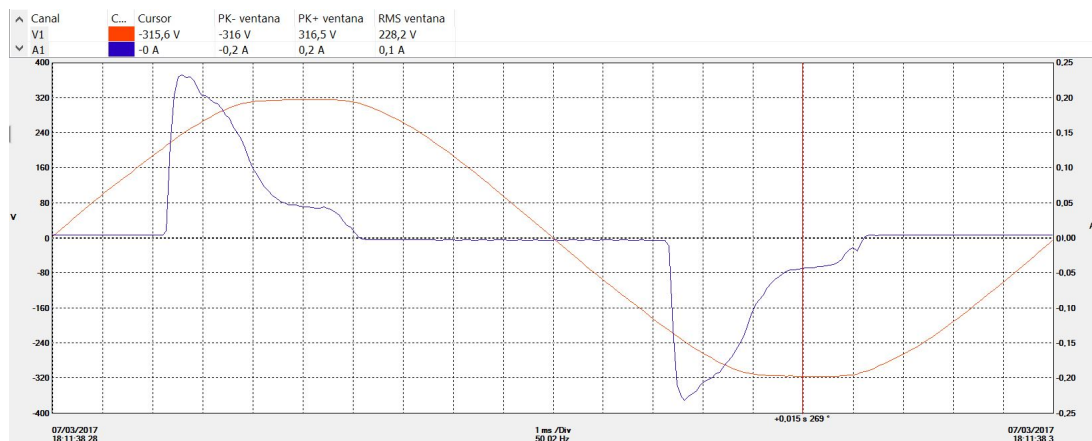


Figura 10.9.0.2 – Forma de onda de la luminaria 9

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	228,3
A rms	A	0,08
F	Hz	50,02
V THDr	% r	1,6
A THDr	% r	71,7
φ	°	-29
P (W)	W	11,16
Q (var)	var	-6,288
D (var)	var	13,07
S (VA)	VA	18,31
PF		0,61
Cos φ (DPF)		0,869

Tabla 10.9.0.2 – Parámetros de la luminaria 9

Se presentan también de nuevo la tabla de armónicos y el espectro en forma de gráficos de barras.

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	%f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	228,3	0	1	100	0,056	0	26	0,1	0,000056	-24
2	0	0	---	2	0	0	---	27	6	0,00336	-158
3	0,3	0,6849	-172	3	73,3	0,041048	176	28	0,1	0,000056	-113
4	0	0	---	4	0,1	0,000056	-143	29	5,4	0,003024	63
5	1,3	2,9679	169	5	45,7	0,025592	14	30	0,1	0,000056	65
6	0	0	---	6	0,2	0,000112	72	31	5,4	0,003024	-84
7	0,8	1,8264	12	7	36,3	0,020328	-138	32	0,1	0,000056	-115
8	0	0	---	8	0,3	0,000168	-95	33	4,8	0,002688	129
9	0,3	0,6849	-145	9	26,9	0,015064	56	34	0	0	---
10	0	0	---	10	0,4	0,000224	90	35	4,4	0,002464	-16
11	0,2	0,4566	8	11	12,9	0,007224	-92	36	0,1	0,000056	-3
12	0	0	---	12	0,4	0,000224	-93	37	3,7	0,002072	-164
13	0	0	---	13	12,3	0,006888	151	38	0,1	0,000056	-175
14	0	0	---	14	0,2	0,000112	84	39	3,2	0,001792	58
15	0	0	---	15	12,4	0,006944	-3	40	0	0	---
16	0	0	---	16	0,1	0,000056	-78	41	3,1	0,001736	-82
17	0	0	---	17	9,9	0,005544	-144	42	0,1	0,000056	-105
18	0	0	---	18	0	0	---	43	3	0,00168	136
19	0	0	---	19	10,7	0,005992	71	44	0,1	0,000056	75
20	0	0	---	20	0	0	---	45	3,1	0,001736	-11
21	0	0	---	21	9,1	0,005096	-85	46	0	0	---
22	0	0	---	22	0,1	0,000056	-14	47	2,8	0,001568	-163
23	0	0	---	23	7,2	0,004032	135	48	0	0	---
24	0	0	---	24	0,1	0,000056	157	49	2,4	0,001344	55
25	0	0	---	25	7,2	0,004032	-9	50	0	0	---

Tabla 10.9.0.3 – Armónicos de la luminaria 9

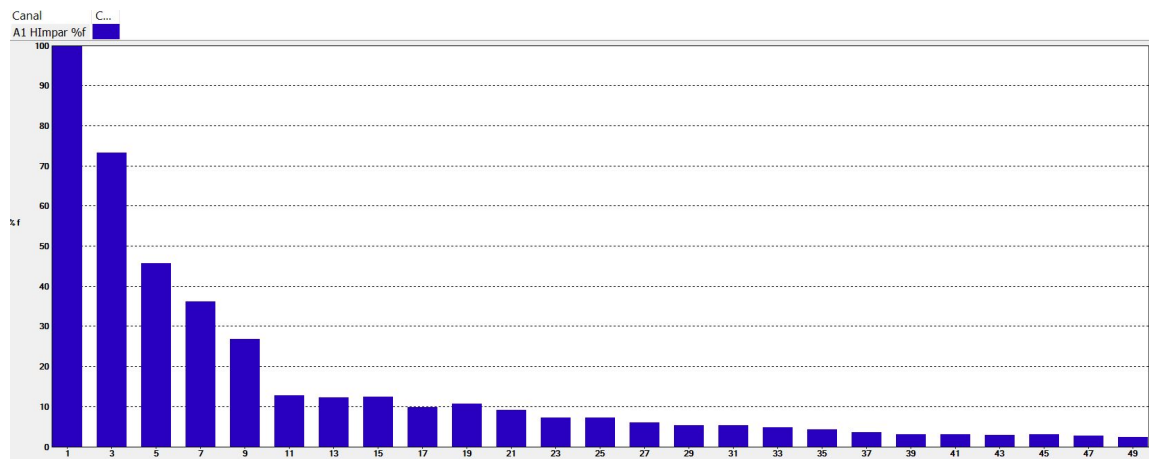


Figura 10.9.0.3 – Espectro armónico de la luminaria 9 (Armónicos impares de corriente)

Potencia de distorsión

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.9.0.1)$$

Calculando el sumatorio con los primeros 25 armónicos impares:

$$D = 228,3 * \sqrt{(0,041048^2) + (0,025592^2) + (0,020328^2) + \dots} = 12,77VAr \quad (10.9.0.2)$$

El cual es un valor muy parecido al obtenido en la tabla 10.9.0.2 de parámetros medidos, que es de 13.07 VAr.

10.10. Luminaria 10 - Froiz CFL

Luminaria de bajo consumo de marca Froiz que presenta las siguientes características según su envase:

Luminaria	10
Tipo	CFL
Marca	Froiz
Potencia (W)	9
Lúmenes	450
Duración	8000 h
Calificación energética	A



Figura 10.10.0.1 – Luminaria 10

Tabla 10.10.0.1 – Características de la luminaria 10

En la figura 10.10.0.2 se puede ver su forma de onda resultante, así como los parámetros básicos más importantes en la tabla 10.10.0.2.

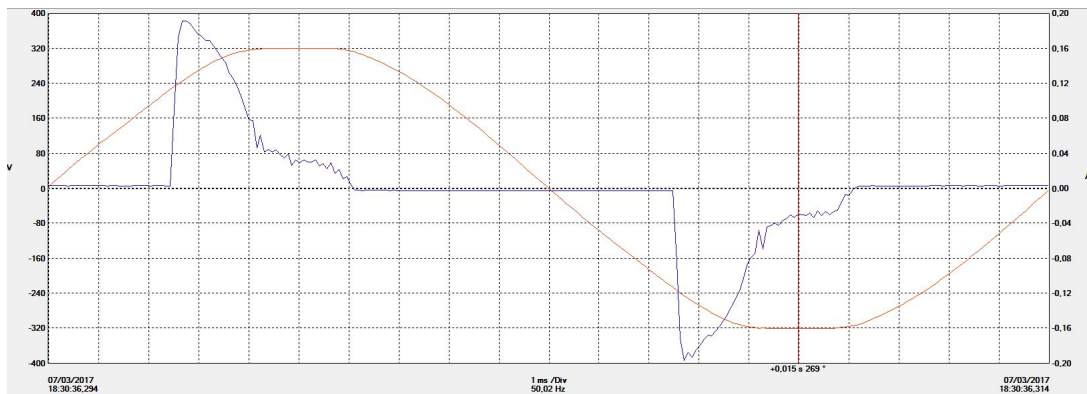


Figura 10.10.0.2 – Forma de onda de la luminaria 10

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	231,6
A rms	A	0,063
F	Hz	50,02
V THDr	% r	1,7
A THDr	% r	74,8
φ	°	-29
P (W)	W	8,493
Q (var)	var	-4,613
D (var)	var	10,78
S (VA)	VA	14,48
PF		0,587
$\text{Cos}\varphi$ (DPF)		0,876

Tabla 10.10.0.2 – Parámetros de la luminaria 10

Se muestran también la tabla 10.10.0.3 de armónicos para tensión y corriente y el espectro de armónicos impares de corriente de la figura 10.10.0.3.

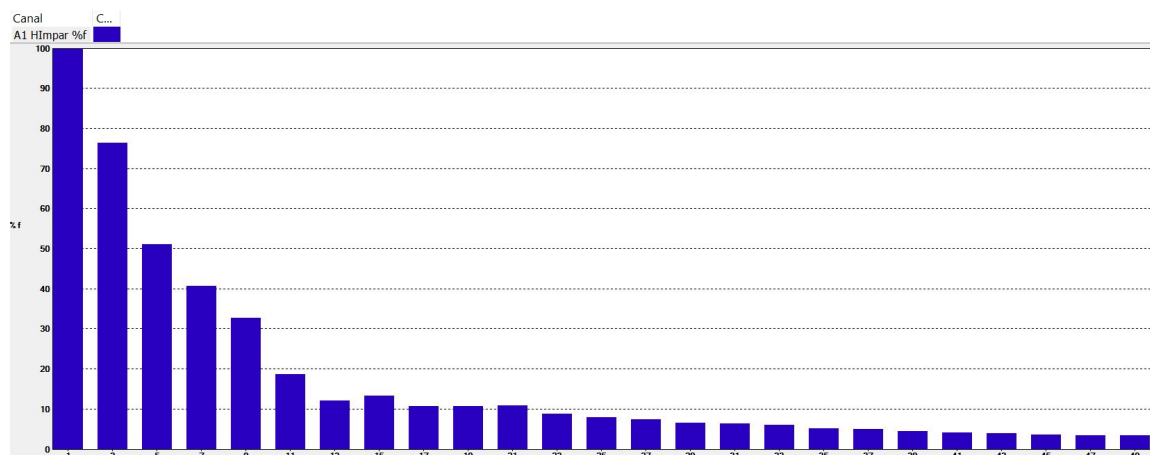


Figura 10.10.0.3 – Espectro armónico de la luminaria 10 (Armónicos impares de corriente)

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	%f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	231,6	0	1	100	0,041	0	26	0,1	0,000041	-125
2	0	0	---	2	0,3	0,000123	52	27	7,5	0,003075	146
3	0,4	0,9264	-173	3	76,5	0,031365	175	28	0,3	0,000123	33
4	0	0	---	4	0,3	0,000123	-66	29	6,6	0,002706	-2
5	1,3	3,0108	158	5	51,1	0,020951	8	30	0,4	0,000164	168
6	0	0	---	6	0,5	0,000205	99	31	6,4	0,002624	-149
7	0,9	2,0844	17	7	40,8	0,016728	-150	32	0,4	0,000164	-54
8	0	0	---	8	0,7	0,000287	-102	33	6	0,00246	57
9	0,3	0,6948	-148	9	32,8	0,013448	42	34	0,3	0,000123	107
10	0	0	---	10	0,5	0,000205	52	35	5,2	0,002132	-92
11	0,1	0,2316	4	11	18,8	0,007708	-121	36	0,1	0,000041	-66
12	0	0	---	12	0,1	0,000041	-97	37	5	0,00205	120
13	0	0	---	13	12,2	0,005002	112	38	0,2	0,000082	90
14	0	0	---	14	0,3	0,000123	126	39	4,5	0,001845	-31
15	0	0	---	15	13,3	0,005453	-34	40	0,2	0,000082	-138
16	0	0	---	16	0,4	0,000164	-80	41	4,1	0,001681	-176
17	0	0	---	17	10,8	0,004428	175	42	0,1	0,000041	-49
18	0	0	---	18	0	0	---	43	4	0,00164	35
19	0	0	---	19	10,7	0,004387	34	44	0,1	0,000041	53
20	0	0	---	20	0,2	0,000082	30	45	3,6	0,001476	-116
21	0	0	---	21	11	0,00451	-124	46	0,1	0,000041	152
22	0	0	---	22	0,3	0,000123	173	47	3,5	0,001435	98
23	0	0	---	23	8,8	0,003608	82	48	0	0	---
24	0	0	---	24	0,2	0,000082	-40	49	3,4	0,001394	-54
25	0	0	---	25	7,9	0,003239	-62	50	0	0	---

Tabla 10.10.0.3 – Armónicos de la luminaria 10

Potencia de distorsión

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.10.0.1)$$

Calculando el sumatorio con los primeros 25 armónicos impares:

$$D = 231,6 * \sqrt{(0,031365^2) + (0,020951^2) + (0,016728^2) + \dots} = 10,36 \text{ VAr} \quad (10.10.0.2)$$

Se obtiene un valor de 10.36 VAr que es prácticamente igual al de la tabla correspondiente, de 10.78 VAr.

10.11. Luminaria 11 - Lexman CFL

Luminaria Lexman, de bajo consumo, con las características presentes en la tabla según el fabricante:

Luminaria	11
Tipo	CFL
Marca	Lexman
Potencia (W)	15
Lúmenes	800
Duración	6000 h
Calificación energética	A



Tabla 10.11.0.1 – Características de la luminaria 11

Figura 10.11.0.1 – Luminaria 11

Se muestra, como en los casos anteriores, su forma de onda y sus parámetros básicos resumidos en la tabla 10.11.0.2. Del mismo modo, se presentan la tabla de armónicos y el espectro de los impares de corriente.

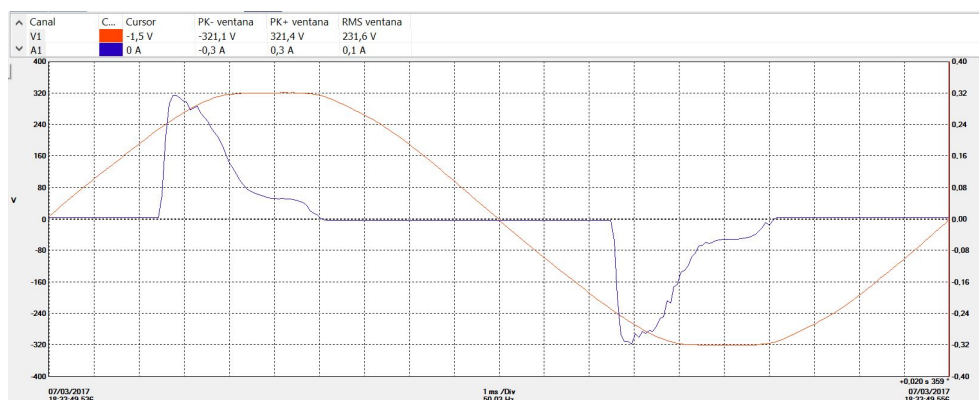


Figura 10.11.0.2 – Forma de onda de la luminaria 11

Parámetro	Unidades	L1
V rms	V	231,7
A rms	A	0,104
F	Hz	50,03
V THDr	% r	1,5
A THDr	% r	75
φ	°	-27
P (W)	W	14,24
Q (var)	var	-7,365
D (var)	var	18,05
S (VA)	VA	24,11
PF		0,591
Cos φ (DPF)		0,887

Tabla 10.11.0.2 – Parámetros de la luminaria 11

Armónicos Tensión (V1)				Armónicos Intensidad (A1)							
n	% f	rms	°	n	%f	rms	°	n	% f	rms	°
1	100	231,8	0	1	100	0,069	0	26	0,1	0,000069	-22
2	0	0	---	2	0,1	0,000069	-91	27	6,8	0,004692	149
3	0,4	0,9272	-177	3	77,8	0,053682	176	28	0,1	0,000069	152
4	0	0	---	4	0	0	---	29	6	0,00414	-4
5	1,2	2,7816	160	5	52,1	0,035949	8	30	0,1	0,000069	-7
6	0	0	---	6	0,2	0,000138	82	31	5,3	0,003657	-149
7	0,7	1,6226	16	7	40,4	0,027876	-150	32	0,1	0,000069	-152
8	0	0	---	8	0,4	0,000276	-115	33	5,3	0,003657	62
9	0,3	0,6954	-148	9	33,1	0,022839	44	34	0,1	0,000069	10
10	0	0	---	10	0,4	0,000276	70	35	4,7	0,003243	-89
11	0,3	0,6954	16	11	20	0,0138	-121	36	0	0	---
12	0	0	---	12	0,4	0,000276	-102	37	4,3	0,002967	123
13	0	0	---	13	11,9	0,008211	107	38	0	0	---
14	0	0	---	14	0,4	0,000276	92	39	4,1	0,002829	-27
15	0	0	---	15	12,9	0,008901	-34	40	0	0	---
16	0	0	---	16	0,3	0,000207	-84	41	3,7	0,002553	-178
17	0	0	---	17	10,7	0,007383	171	42	0,1	0,000069	-47
18	0	0	---	18	0,1	0,000069	103	43	3,2	0,002208	33
19	0	0	---	19	9,5	0,006555	33	44	0,1	0,000069	109
20	0	0	---	20	0,1	0,000069	-45	45	2,8	0,001932	-114
21	0	0	---	21	10,3	0,007107	-120	46	0,1	0,000069	-79
22	0	0	---	22	0	0	---	47	2,6	0,001794	103
23	0	0	---	23	8,7	0,006003	81	48	0	0	---
24	0	0	---	24	0	0	---	49	2,7	0,001863	-46
25	0	0	---	25	6,9	0,004761	-64	50	0	0	---

Tabla 10.11.0.3 – Armónicos de la luminaria 11

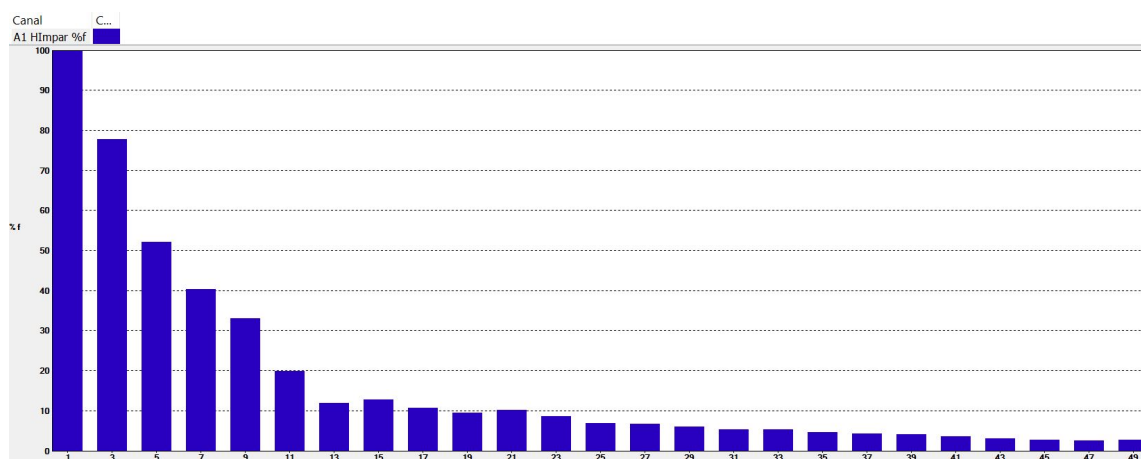


Figura 10.11.0.3 – Espectro armónico de la luminaria 11 (Armónicos impares de corriente)

Potencia de distorsión

$$D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2} \quad (10.11.0.1)$$

Calculando el sumatorio con los primeros 25 armónicos impares:

$$D = 231,7 * \sqrt{(0,053682^2) + (0,035949^2) + (0,027876^2) + \dots} = 17,67VAr \quad (10.11.0.2)$$

El valor obtenido es comparable al presentado en la tabla de parámetros para la potencia de distorsión.

11 Modelización individual de las luminarias

En este anexo se muestran los resultados de la modelización individual de las luminarias estudiadas. En este caso se realiza el circuito equivalente en paralelo de cada una de las luminarias, con los siguientes parámetros, que se han obtenido con la realización de medidas con el analizador de redes.

- Una fuente de tensión a la frecuencia fundamental y con el valor de la tensión de la red que será alrededor de 230V, en este caso multiplicado por 1.4142 porque el programa pide el valor máximo y el analizador proporciona el valor eficaz.
- Una resistencia cuyo valor se obtiene según esta fórmula, dividiendo la tensión a la que se ha realizado la medida elevada al cuadrado, entre la potencia activa obtenida con el analizador [4].

$$R = V_1^2 / P \quad (11.0.0.1)$$

- Un condensador (ya que las luminarias son capacitivas) que se calcula según esta fórmula, utilizando la potencia reactiva y a frecuencia fundamental [4].

$$C = Q / (\omega * V_1^2) \quad (11.0.0.2)$$

- Una fuente de corriente para cada uno de los armónicos, con el valor correspondiente de corriente (obtenido de las tablas de armónicos y multiplicado de nuevo por 1,4142) y la frecuencia para el orden de cada armónico. En este caso se han elegido los armónicos impares hasta el número 11, ya que se considera que el resto pueden ser despreciables a la hora de realizar la modelización, y la forma de onda es bastante correcta.

Se procede, por tanto, a modelizar todas las luminarias anteriormente mostradas.

11.1. Luminaria 1 - Lexman LED

Los valores del circuito equivalente en paralelo para la resistencia y el condensador en este caso serán los siguientes:

$$R = 231,1^2 / 12,22 = 4370\Omega \quad (11.1.0.1)$$

$$C = 8,399 / (2 * \pi * 50 * 231,1^2) = 0,5\mu F \quad (11.1.0.2)$$

En la figura 11.1.0.1 se muestra el resultado del circuito, una vez están situados los valores correspondientes de las fuentes de corriente.

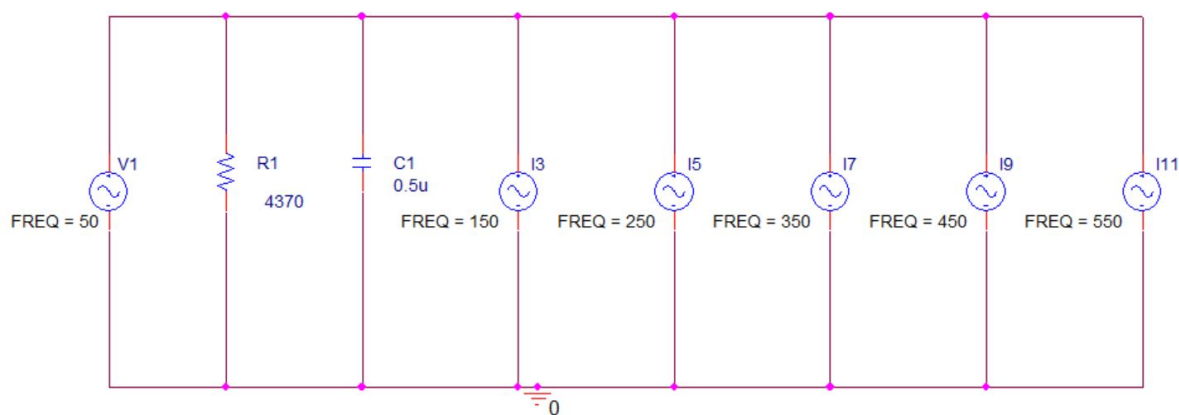


Figura 11.1.0.1 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 1

Del mismo modo, se muestra la forma de la onda de corriente modelizada con el Pspice en la figura 11.1.0.2.

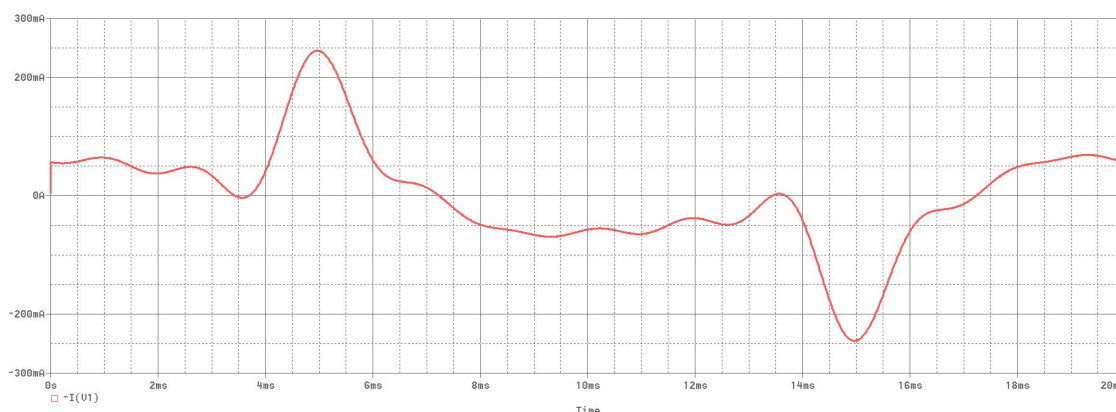


Figura 11.1.0.2 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 1

11.2. Luminaria 2 - MegaLED

En este caso se han realizado medidas para una luminaria sola y dos en paralelo, por lo que se hará la modelización para ambos casos.

Los valores del circuito equivalente en paralelo para la resistencia y el condensador para una luminaria serán los siguientes:

$$R = 231,4^2 / 5,806 = 9222\Omega \quad (11.2.0.1)$$

$$C = 3,573 / (2 * \pi * 50 * 231,4^2) = 0,22\mu F \quad (11.2.0.2)$$

En la figura 11.2.0.1 se puede ver el esquema del circuito equivalente de la luminaria en paralelo.

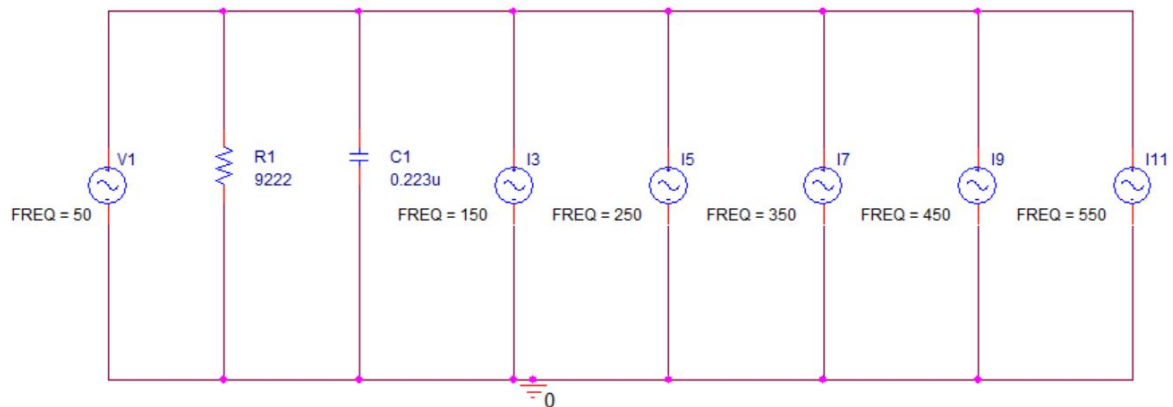


Figura 11.2.0.1 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 2 (una luminaria)

Se modeliza con el Pspice la forma de onda de la corriente, y se presenta en la figura 11.2.0.2.

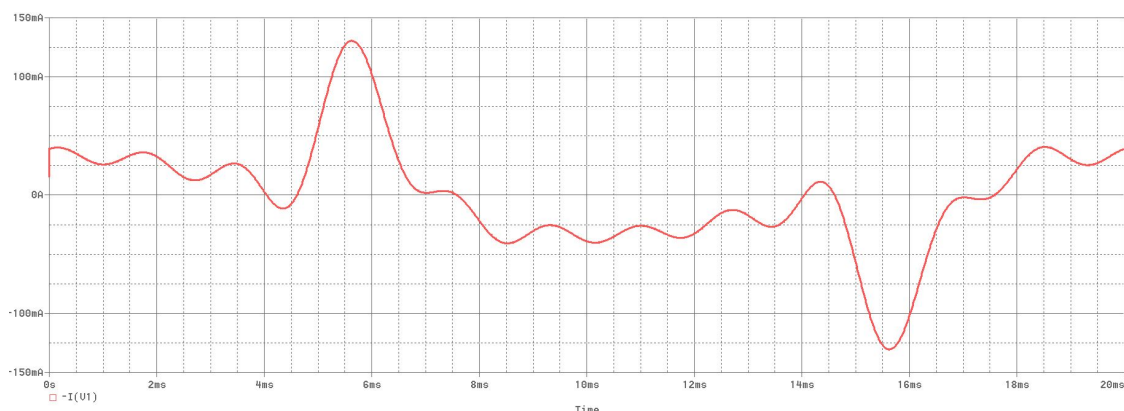


Figura 11.2.0.2 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 2 (una luminaria)

Caso de dos luminarias en paralelo

En este apartado se muestra la modelización para la medida de dos luminarias de esta marca en paralelo, comprobando que las formas de onda son prácticamente iguales, pero se duplican los valores.

Se calculan los valores de resistencia y condensador del circuito:

$$R = 231,3^2 / 11,73 = 4650,9\Omega \quad (11.2.0.3)$$

$$C = 7,379 / (2 * \pi * 50 * 231,3^2) = 0,439\mu F \quad (11.2.0.4)$$

Se dan valores a las fuentes de corriente, y resulta el circuito de la figura 11.2.0.3.

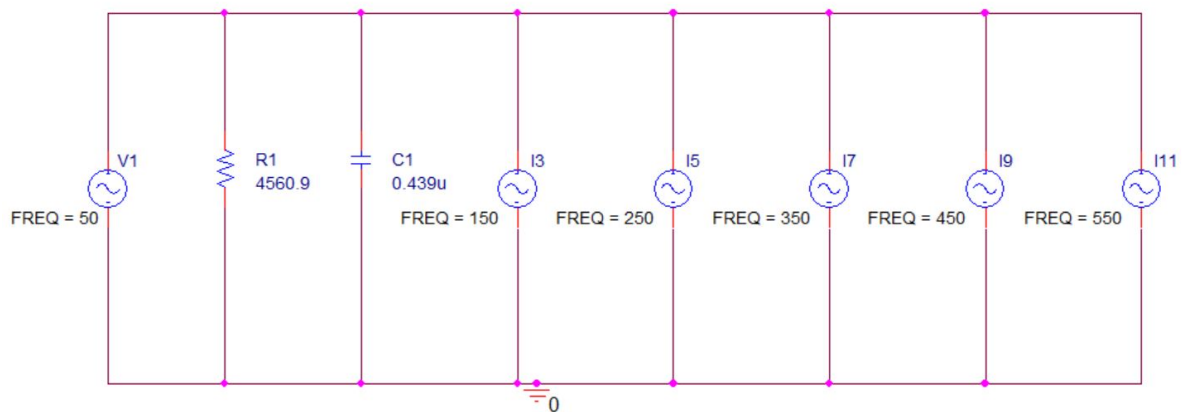


Figura 11.2.0.3 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 2 (dos luminarias)

Se modeliza la forma de onda, obteniéndose lo mostrado en la siguiente figura.

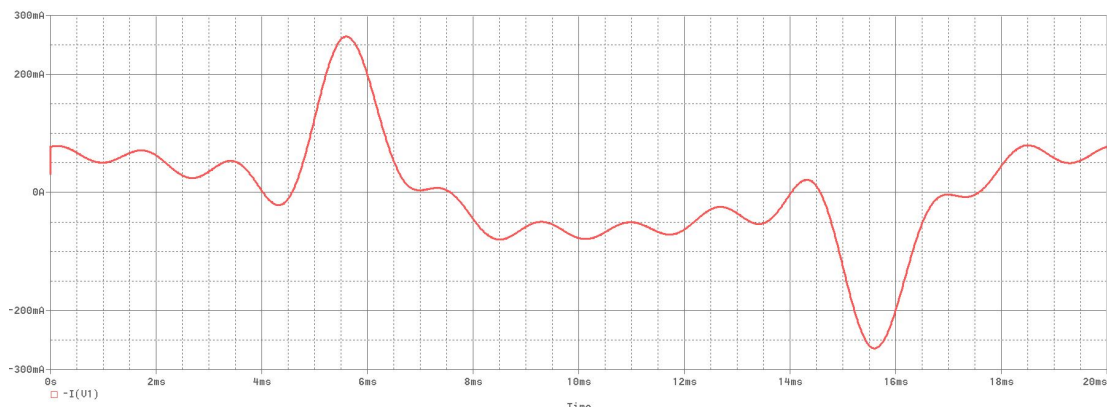


Figura 11.2.0.4 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 2 (dos luminarias)

11.3. Luminaria 3 - LED

Se calculan los parámetros para el circuito equivalente, que serán los mostrados en las siguientes ecuaciones:

$$R = 231,4^2 / 6,169 = 8680\Omega \quad (11.3.0.1)$$

$$C = 4,27 / (2 * \pi * 50 * 231,4^2) = 0,25\mu F \quad (11.3.0.2)$$

El circuito en paralelo correspondiente se muestra en la figura 11.3.0.1.

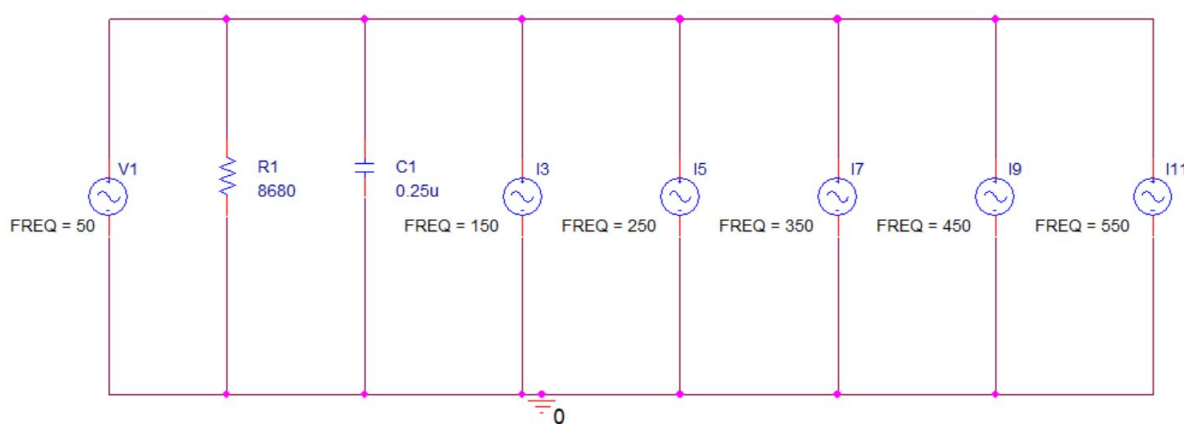


Figura 11.3.0.1 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 3

Se realiza un análisis con el Pspice obteniéndose la siguiente forma de onda de la imagen:

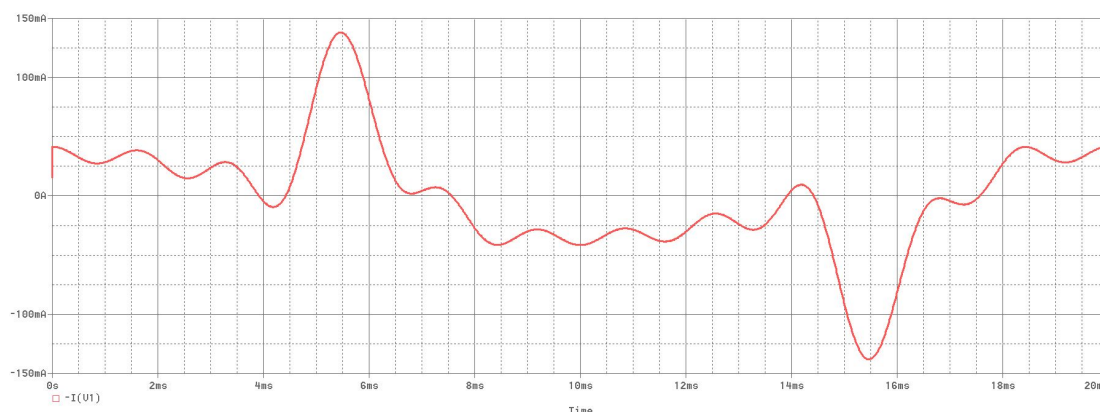


Figura 11.3.0.2 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 3

11.4. Luminaria 4 - Philips LED

Los valores de la resistencia y condensador del circuito paralelo correspondiente son los aquí calculados:

$$R = 231,5^2 / 10,54 = 5085\Omega \quad (11.4.0.1)$$

$$C = 3,967 / (2 * \pi * 50 * 231,5^2) = 0,2356\mu F \quad (11.4.0.2)$$

Se dan valores a las fuentes de corriente, y se genera el circuito de la figura 11.4.0.1.

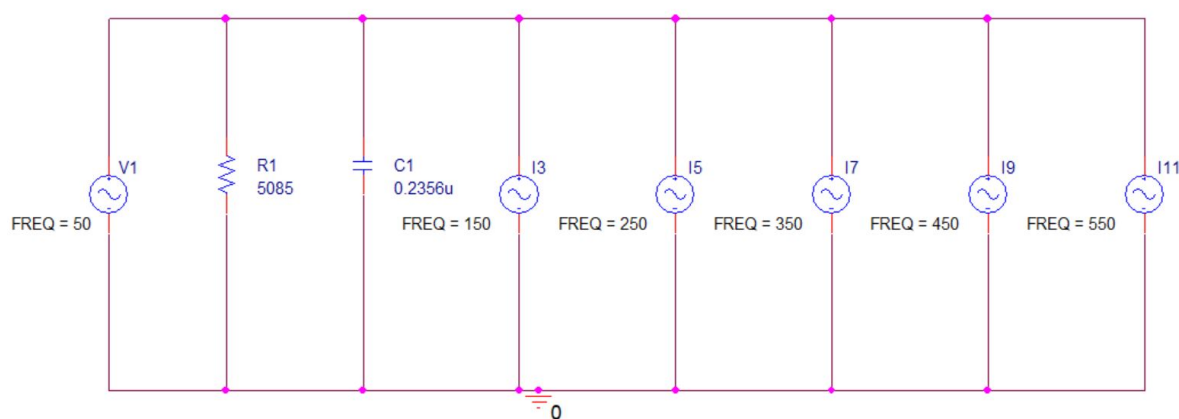


Figura 11.4.0.1 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 4

La forma de onda obtenida con la modelización en Pspice se muestra en la imagen.

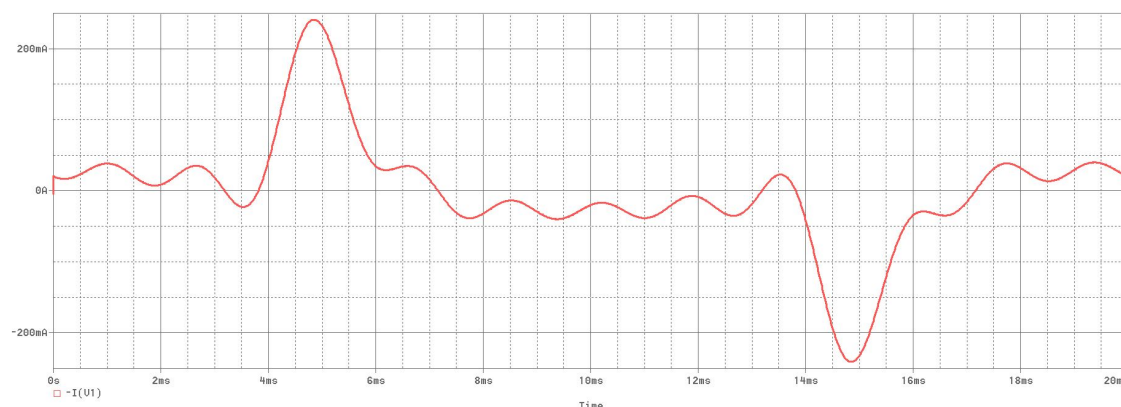


Figura 11.4.0.2 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 4

11.5. Luminaria 5 - Roblan LED

Se muestran los cálculos realizados a partir de las ecuaciones para calcular los parámetros del circuito equivalente para esta luminaria:

$$R = 231,3^2 / 9,70 = 5515,4\Omega \quad (11.5.0.1)$$

$$C = 11,60 / (2 * \pi * 50 * 231,3^2) = 0,69\mu F \quad (11.5.0.2)$$

Con los valores dados a la resistencia y condensador y los parámetros de las fuentes de corriente, se genera el circuito equivalente.

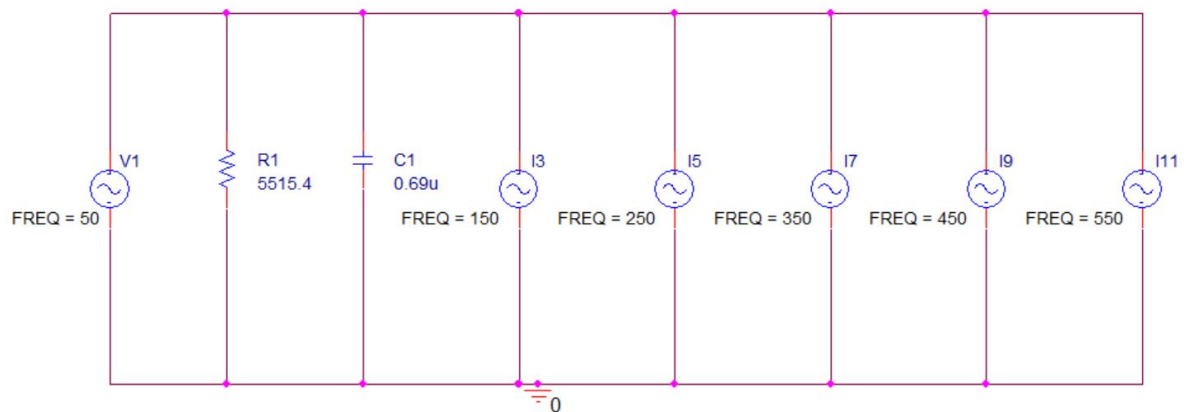


Figura 11.5.0.1 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 5

De nuevo se traza la forma de onda de la luminaria con el Pspice, y se muestra en la figura 11.5.0.2.

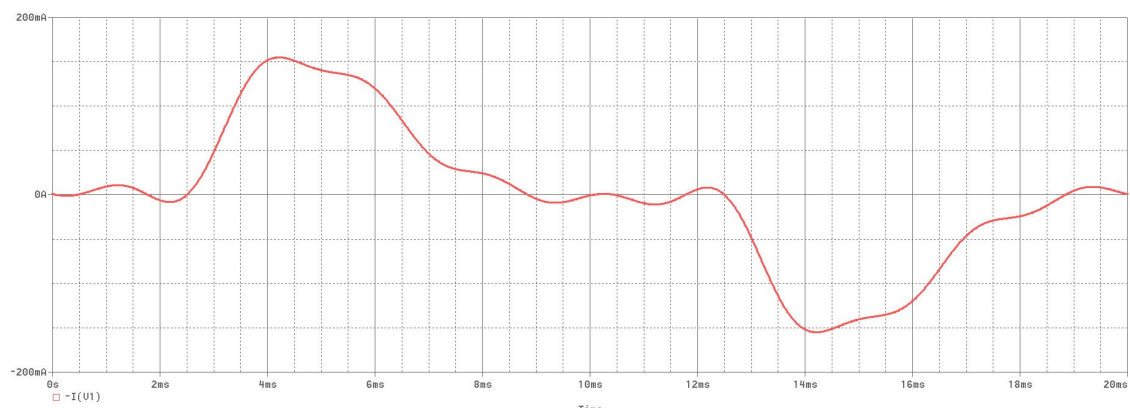


Figura 11.5.0.2 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 5

11.6. Luminaria 6 - H2V LED

Se muestran las ecuaciones para el cálculo del condensador y la resistencia del circuito paralelo de esta luminaria.

$$R = 231,5^2 / 9,632 = 5564\Omega \quad (11.6.0.1)$$

$$C = 3,474 / (2 * \pi * 50 * 231,5^2) = 0,206\mu F \quad (11.6.0.2)$$

Estos parámetros dan lugar al circuito representado en la siguiente imagen.

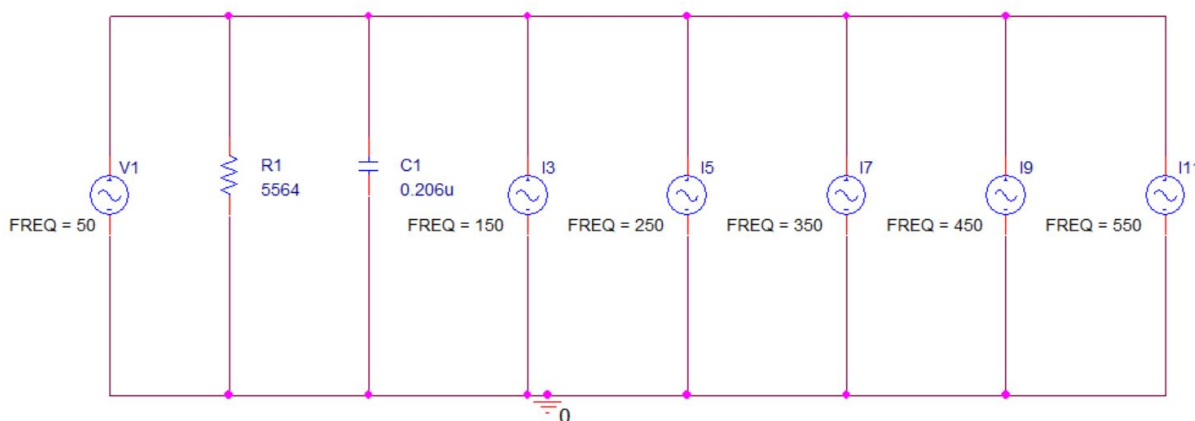


Figura 11.6.0.1 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 6

Del circuito de la figura anterior, resulta la siguiente forma de onda modelizada para la luminaria de marca H2V.

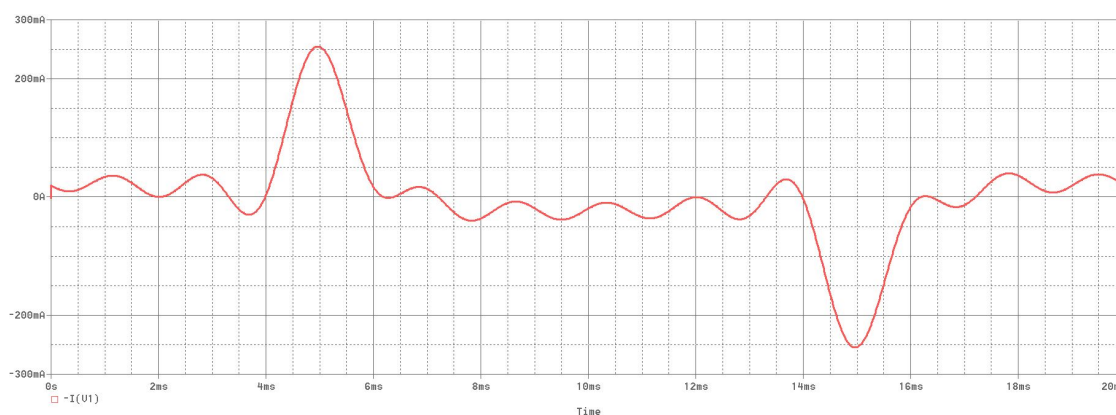


Figura 11.6.0.2 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 6

11.7. Luminaria 7 - Lexman CFL

En este caso, para este tipo de luminaria de bajo consumo, se han realizado de nuevo dos medidas, una para una luminaria y otra con dos en paralelo.

Se calculan los parámetros para el circuito de una luminaria:

$$R = 231,8^2 / 21,36 = 2515,5\Omega \quad (11.7.0.1)$$

$$C = 10,06 / (2 * \pi * 50 * 231,8^2) = 0,6\mu F \quad (11.7.0.2)$$

Con estos parámetros, se dibuja el siguiente circuito de la figura, para hacer la posterior modelización.

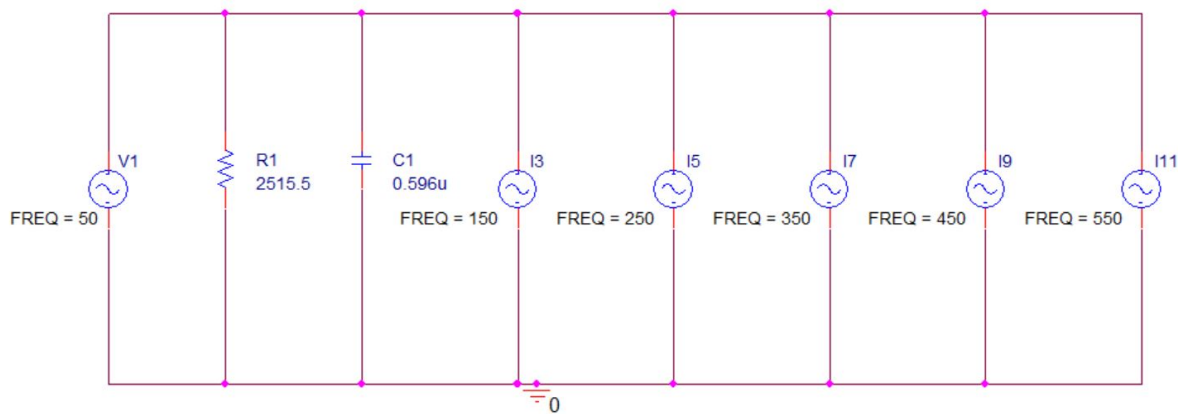


Figura 11.7.0.1 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 7 (una luminaria)

Una vez realizado el circuito, se simula y se obtiene la forma de onda para la luminaria deseada, que se muestra en la figura 11.7.0.2.

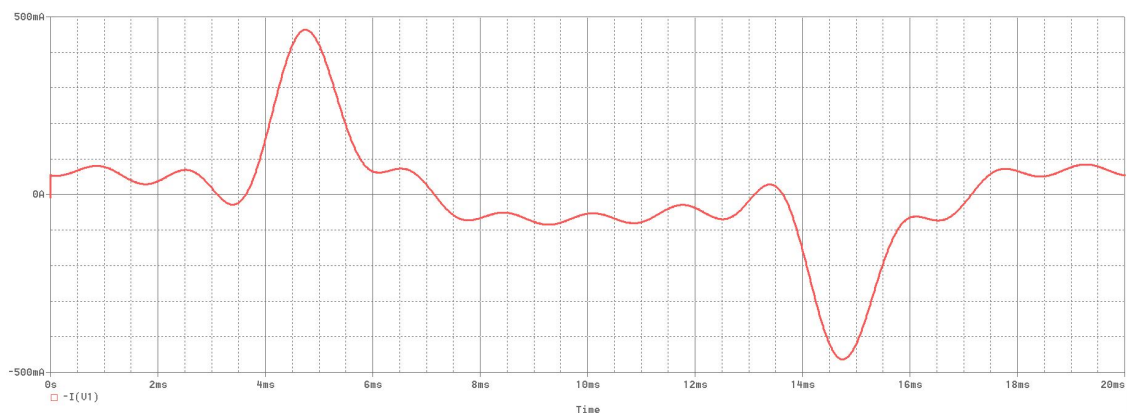


Figura 11.7.0.2 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 7 (una luminaria)

Caso de dos luminarias en paralelo

Se realizan ahora los cálculos para el circuito que corresponde a dos luminarias de este modelo en paralelo.

La resistencia y condensador del circuito tendrán estos valores:

$$R = 232,1^2 / 43,15 = 1248,4\Omega \quad (11.7.0.3)$$

$$C = 20,65 / (2 * \pi * 50 * 232,1^2) = 1,22\mu F \quad (11.7.0.4)$$

Estos parámetros (y el resto de los que hay que aplicar a las fuentes de corriente) dan lugar al circuito que se muestra:

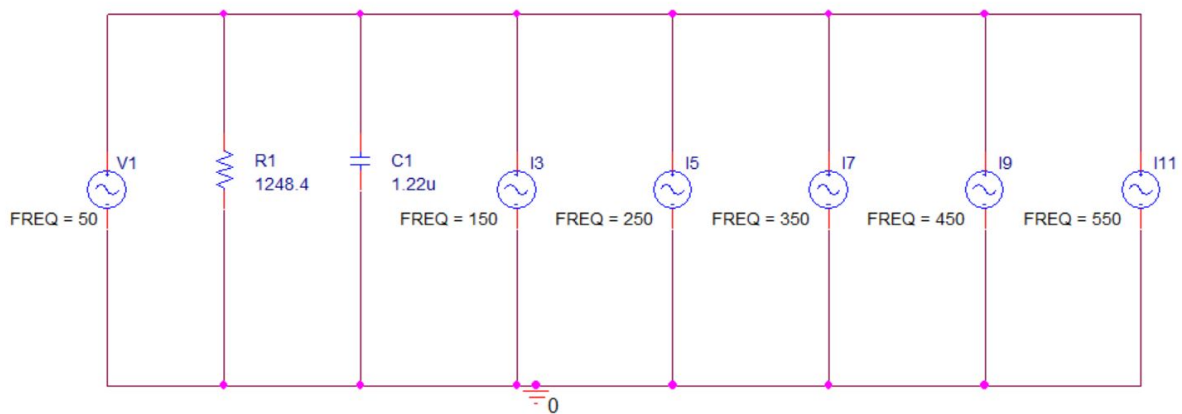


Figura 11.7.0.3 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 7 (dos luminarias)

La forma de onda resultante es la que sigue:

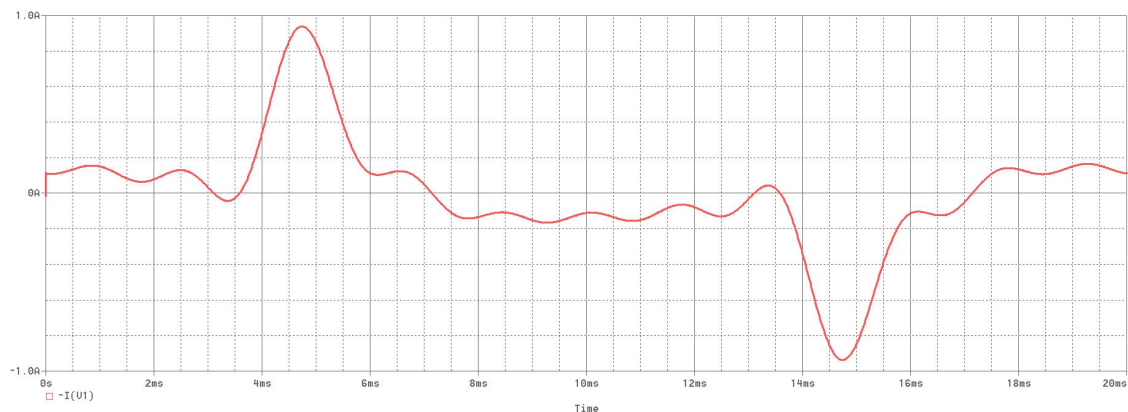


Figura 11.7.0.4 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 7 (dos luminarias)

11.8. Luminaria 8 - Lexman CFL

De nuevo se vuelve a realizar la modelización para el caso individual y de dos luminarias juntas.

Para el primer caso de una luminaria, el circuito tendrá los siguientes valores:

$$R = 229,3^2 / 20,99 = 2505\Omega \quad (11.8.0.1)$$

$$C = 9,986 / (2 * \pi * 50 * 229,3^2) = 0,604\mu F \quad (11.8.0.2)$$

El circuito resultante para una luminaria es el mostrado en la figura.

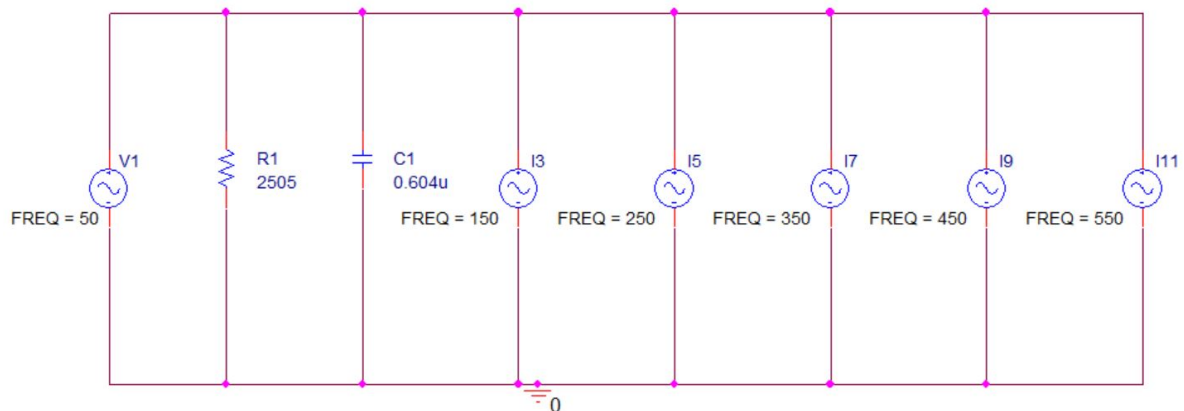


Figura 11.8.0.1 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 8 (una luminaria)

Posteriormente se modeliza la forma de onda de la corriente deseada, cuyo resultado se muestra en la gráfica.

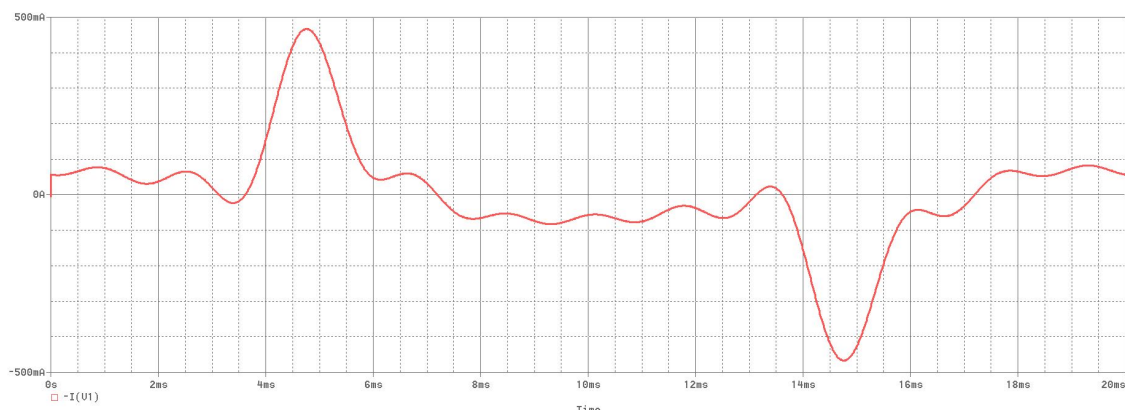


Figura 11.8.0.2 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 8 (una luminaria)

Caso de dos luminarias en paralelo

Los cálculos realizados en este apartado corresponden al caso de dos luminarias juntas de este modelo marca Lexman, de bajo consumo.

$$R = 229,1^2 / 42,49 = 1235,3\Omega \quad (11.8.0.3)$$

$$C = 20,02 / (2 * \pi * 50 * 229,1^2) = 1,21\mu F \quad (11.8.0.4)$$

Una vez calculados los valores correspondientes, se diseña el circuito equivalente para las luminarias.

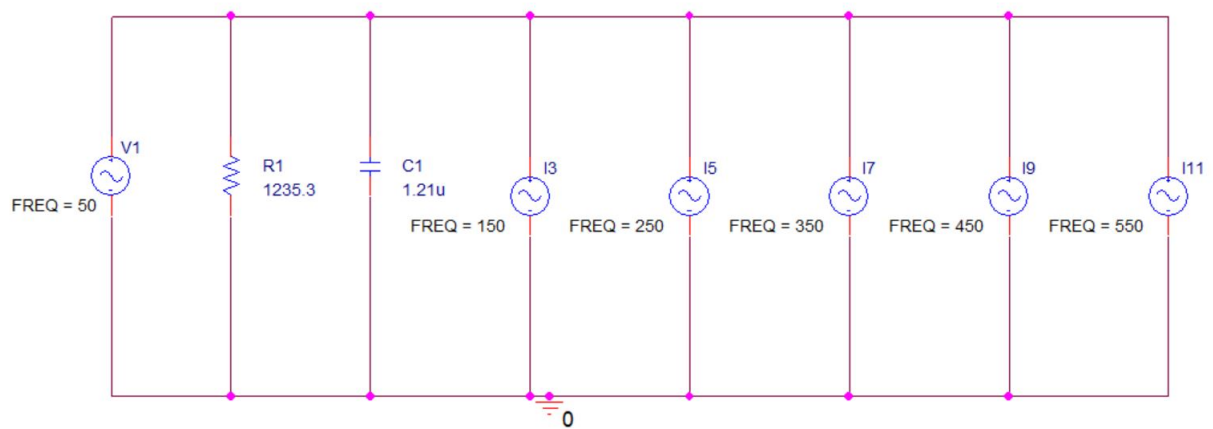


Figura 11.8.0.3 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 8 (dos luminarias)

Esto da lugar a la siguiente forma de onda que, como se puede observar, es prácticamente idéntica a la calculada para el caso anterior de una luminaria.

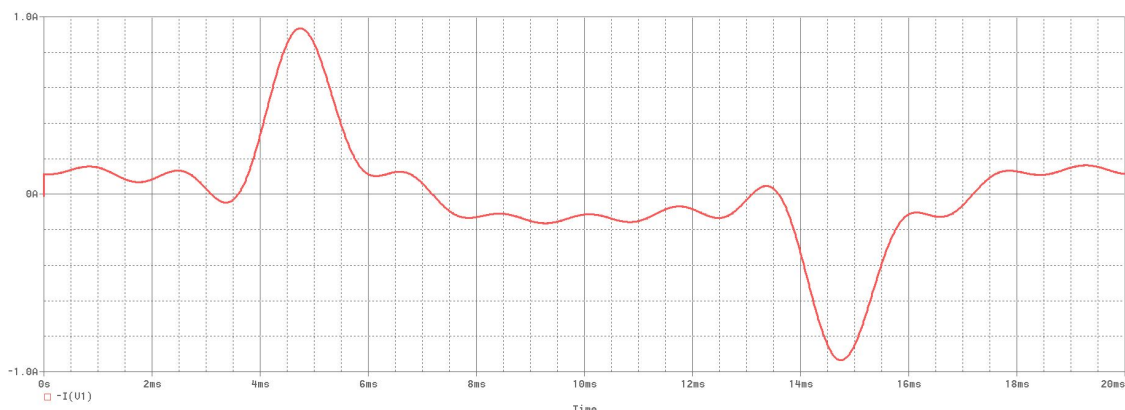


Figura 11.8.0.4 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 8 (dos luminarias)

11.9. Luminaria 9 - Froiz CFL

Valores de resistencia y condensador del circuito en paralelo:

$$R = 228,3^2 / 11,16 = 4670,3\Omega \quad (11.9.0.1)$$

$$C = 6,288 / (2 * \pi * 50 * 228,3^2) = 0,384\mu F \quad (11.9.0.2)$$

El circuito resultante es el de la figura 11.9.0.1.

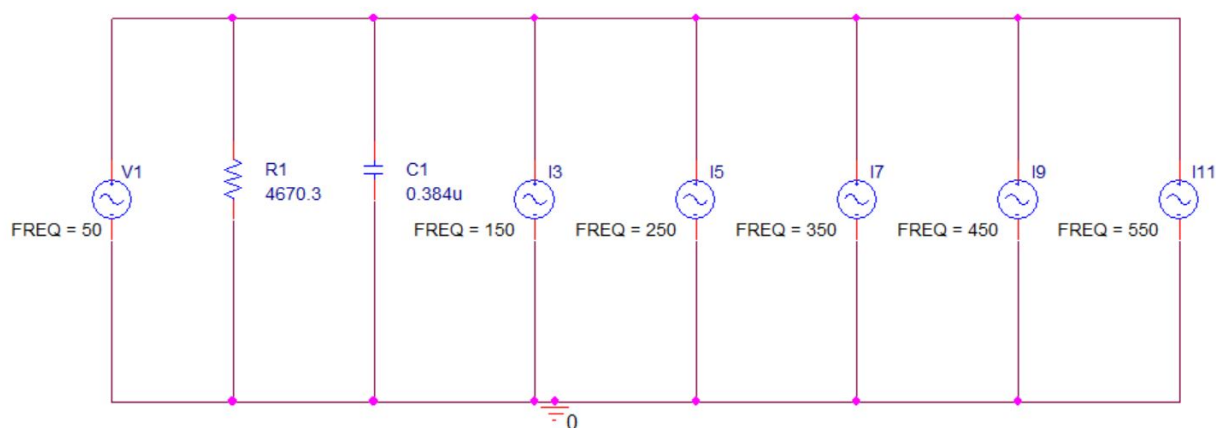


Figura 11.9.0.1 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 9

Simulando, este circuito para la luminaria Froiz presenta la forma de onda de la imagen:

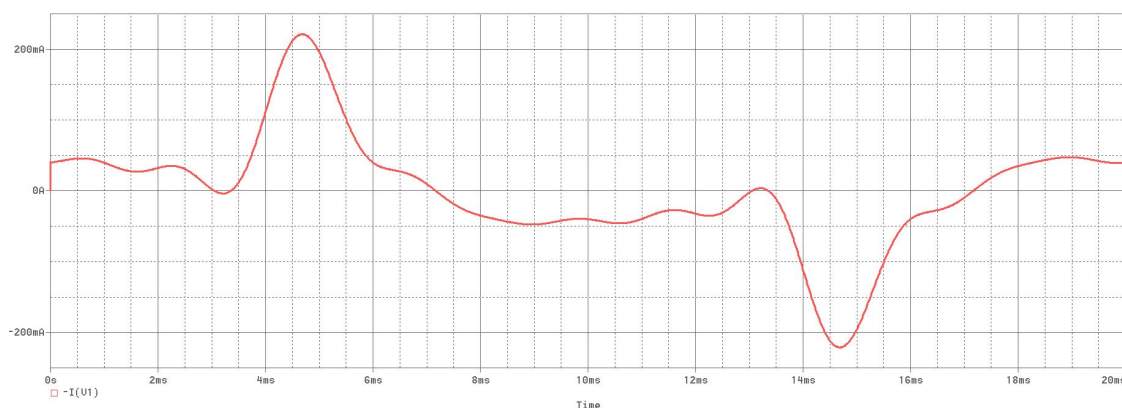


Figura 11.9.0.2 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 9

11.10. Luminaria 10 - Froiz CFL

Se calculan los parámetros para esta luminaria de 9W, con los que se hará el circuito equivalente.

$$R = 231,6^2 / 8,493 = 6315,6\Omega \quad (11.10.0.1)$$

$$C = 4,613 / (2 * \pi * 50 * 231,6^2) = 0,274\mu F \quad (11.10.0.2)$$

En la siguiente imagen se observa el circuito completo para esta luminaria, con todos sus valores.

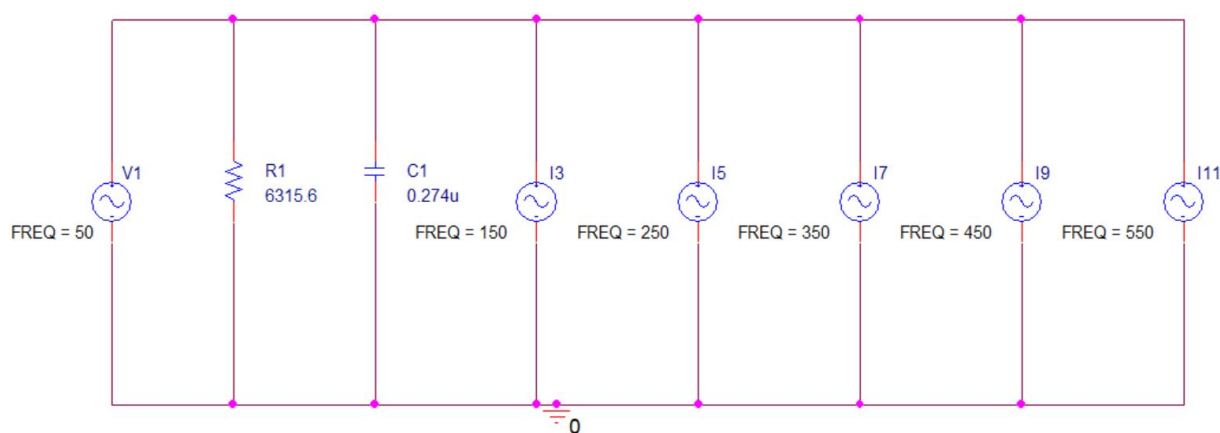


Figura 11.10.0.1 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 10

También se presenta la forma de onda de corriente resultante, que es el valor que interesa para el estudio de la luminaria.

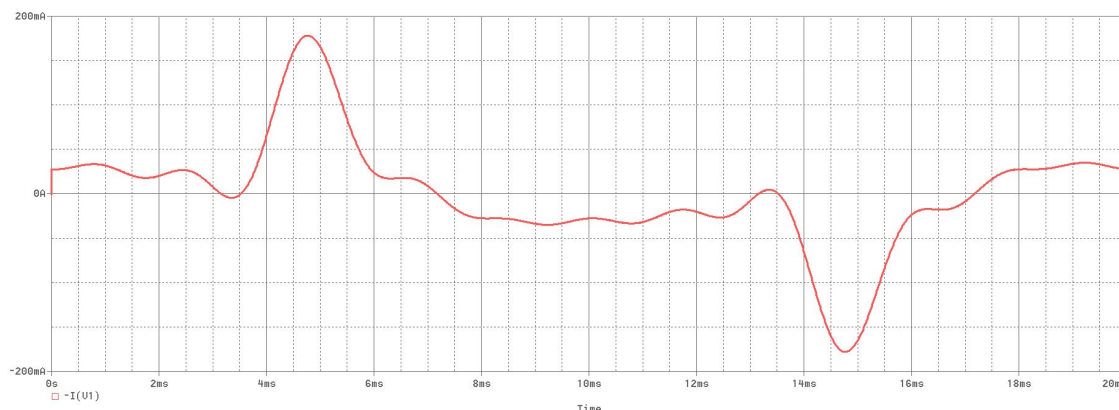


Figura 11.10.0.2 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 10

11.11. Luminaria 11 - Lexman CFL

Por último, se modeliza la luminaria marca Lexman de bajo consumo, con los siguientes parámetros para su circuito:

$$R = 231,7^2 / 14,24 = 3770\Omega \quad (11.11.0.1)$$

$$C = 7,365 / (2 * \pi * 50 * 231,7^2) = 0,437\mu F \quad (11.11.0.2)$$

Se realiza el esquema correspondiente de la figura 11.11.0.1, que será el que se utilice para la modelización de la forma de onda.

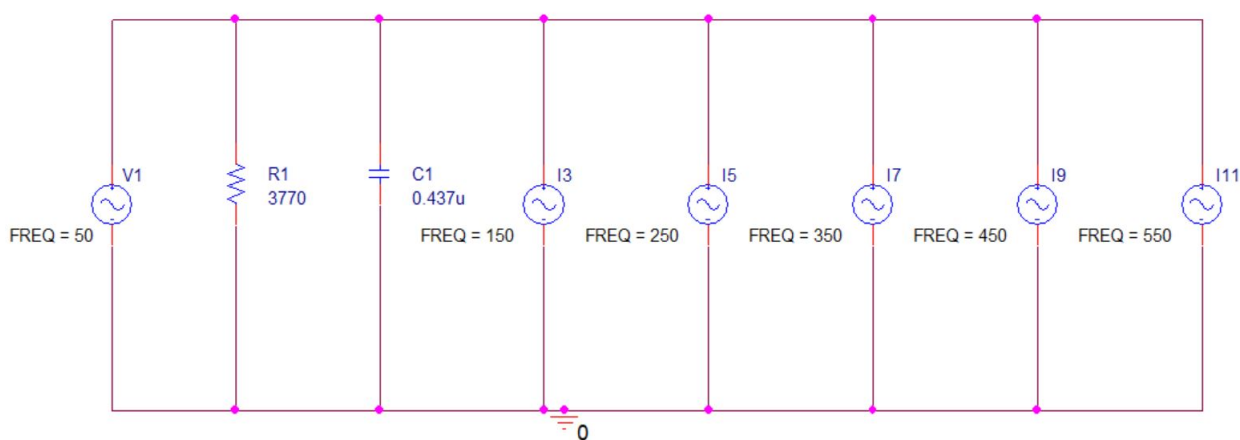


Figura 11.11.0.1 – Circuito equivalente paralelo para la luminaria 11

Finalmente, se muestra la gráfica con la onda de corriente de la luminaria.

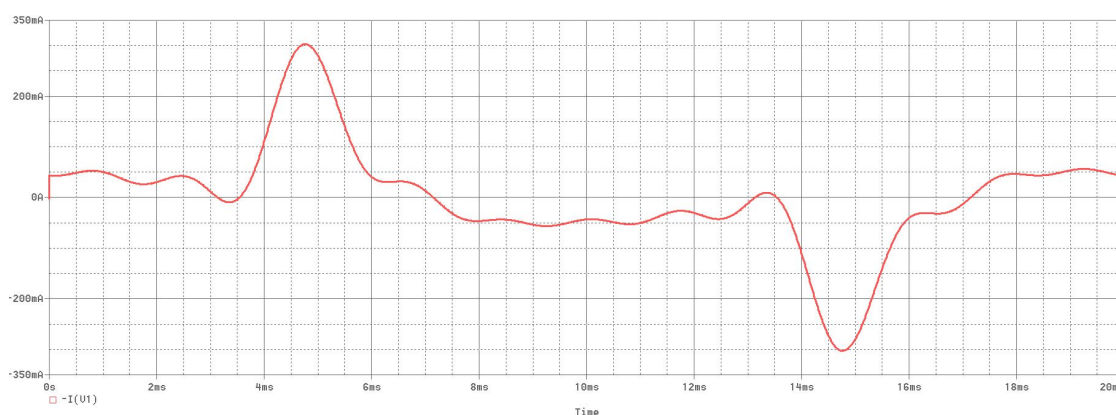


Figura 11.11.0.2 – Onda de corriente modelizada para la luminaria 11